

2019 年度

修 士 論 文

水源貯水池における洪水時濁水の
早期排出に関する研究

首都大学東京大学院 都市環境科学研究科
都市基盤環境学域 環境水理学研究室

18851502 井口 慧

指導教員 教授 横山勝英

水源貯水池における洪水時濁水の早期排出に関する研究

学修番号 18851502 井口 慧
都市基盤環境学域 環境システム分野
指導教員 教授 横山 勝英

1. 研究目的

水源貯水池では洪水時に上流から懸濁物質 (SS) が流入し、滞留することによって、濁水長期化が発生するため、選択取水設備による濁水の早期放流が 1990 年代以降行われるようになってきている。一方、水質対策として、河川流入部のアオコを拡散防止するための分画フェンスが設置されるが、分画フェンスには湖内の水温や流動を変化させる効果があることが最近分かってきた。そのため、選択取水設備と分画フェンスを組み合わせることで効率的に SS を排出できる可能性がある。

ここで、SS 粒子の沈降速度について、理論式を用いても実際の沈降現象を再現できないことが知られており、例えば梅田らは確率沈降モデルを提唱している。SS の沈降速度は排出の検討に大きく影響するため、適切に表現することは重要である。

そこで、本研究では、洪水濁水の観測を行い、採水したサンプルの粒度・SS 濃度を分析し、貯水池内の SS 粒子の沈降速度の検討をした。次に、三次元流動シミュレーションを用いて、選択取水設備と分画フェンスの運用法の違いが SS の排出率に与える影響についてケーススタディーを行った。

2. 研究方法

研究対象地は、東京都水道局が管理する小河内貯水池である。ダム堤体付近に選択取水設備、河川流入部には分画フェンスが設けられている。

観測は、9 月 10, 13, 17, 24, 30 日において、4 地点で水温・濁度の鉛直分布を測定し、2 地点で濁水層からサンプルを摂取した (図 1)。サンプルは、粒度分析と、ろ過器を用いた SS 濃度測定を行った。貯水池の三次元流動シミュレーションモデルの基礎式は、連続式と 3 次元 Navier-Stokes 式であり、鉛直方向は静水圧近似である。SS の沈降速度については、計算する粒径を 11 に分類し、それぞれの粒径に対し stokes 式で沈降速度を求め、減衰率の考え方による補正を行った。計算の水平格子は 50m とし、鉛直格子は 0.25m~10m とした。計算期間は 2019 年 9 月 7 日~30 日であり、時間ステップは $dt=15$ 秒とした。

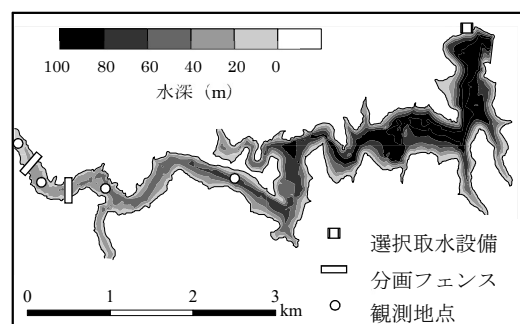


図 1 小河内貯水池の概要

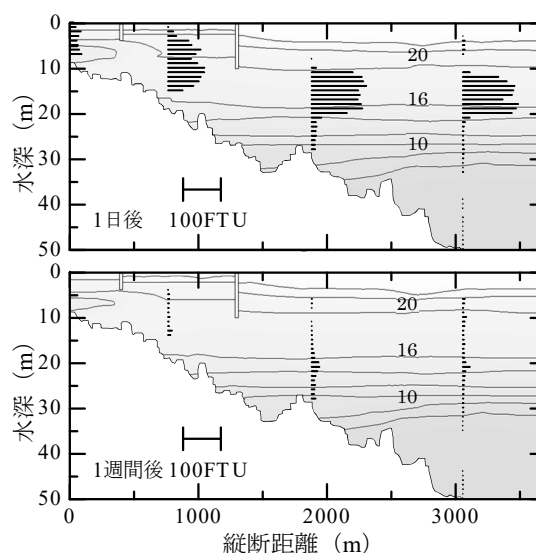


図 2 洪水後の水温と濁水の鉛直分布

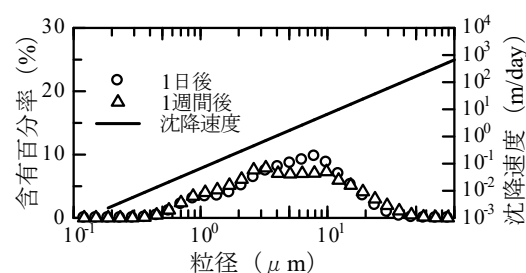


図 3 粒度分布と粒径による沈降速度

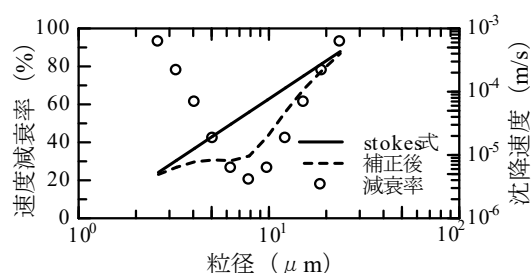


図 4 減衰率と補正後の沈降速度

3. SS 沈降速度の減衰率の作成

台風 15 号の濁水は、水深 10~20m にかけて広がっており（図 2）、約 3 週間で洪水前の状態に戻ることが分かった。水深 20m での濁水の粒度分析の結果、 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子が 70%を占めており、1 週間後も同様であった（図 3）。これより、 $10\mu\text{m}$ までの粒子の沈降速度に大きな差はないと考えられた。一方、stokes 式で算出される沈降速度は、 $2.63\mu\text{m}$ の粒子は 0.5m/day 、 $9.83\mu\text{m}$ の粒子は 6.4m/day であり、1 オーダー異なる。そこで、三次元シミュレーションでの再現計算では、Case-1：各粒径の stokes 沈降速度を与えた場合、Case-2：各粒径の沈降速度に対しそれぞれ減衰率を設け（図 4）、補正した場合の 2 ケースを作成した。Case-1 では $7.887\mu\text{m}$ の粒子が 3 日後の水深 20m に存在せず、実測データと合わなかった（図 5）。また、全粒径を合計すると（図 6）、Case-1 では、1 日後に水深 20~30m まで SS が沈降しているが、Case2 では、観測値と同じ深度で沈降を表現することができた。以上より、SS の挙動を再現できる減衰率を作成することができた。

4. 施設運用の違いが SS 排出に及ぼす影響の検討

計算ケースは、取水深度を Case-A:10m, Case-B:20m, Case-C:30m, Case-D:40m とし、分画フェンスを Case-I：無し、Case-II：有りとした、計 8 ケースのモデルを作成した（表 1）。最も SS を排出することができたのは、Case-B-II（20m・有）であり、SS 全体の 19%、粒径 $10\mu\text{m}$ 以下では 41%を排出した。取水深度に関しては、20m の排出率が最も高く、以降 30, 10, 40m と低下した。水温と SS の鉛直分布を比較したところ（図 7）、取水深度 10m の場合、粒子が沈み込んで水深 10m より深い場所を流れ、排出できていなかった。20m の場合、水温二次躍層と SS のピーク深度が一致し、取水口に最も多くの SS が到達したため、排出率が高くなったと考えられる。また、分画フェンスに関して、フェンスが有る場合は、無い場合に比べ排出率は 2~5%上昇した。これは、分画フェンスによって、濁水が二次躍層付近に誘導され、まとまって水平移動し、取水口に到達するまでの時間が短くなるため、排出される SS 量が多くなるためだと考えられる。

以上より、濁水を分画フェンスによって、中層に誘導し水温二次躍層内で水平移動させること、取水深度を SS が流入から取水までに沈降する深度に合わせるものの組み合わせが重要であることが分かった。

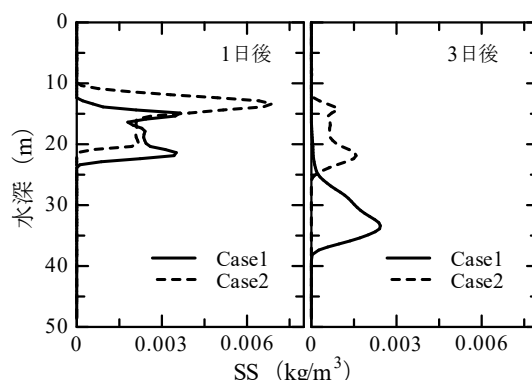


図 5 $7.887\mu\text{m}$ の粒子の計算値の比較

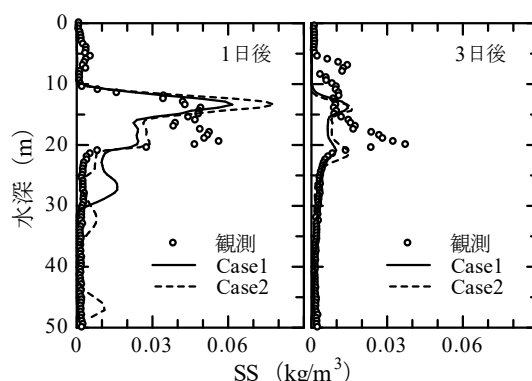


図 6 SS（全粒径）の観測値と計算値の比較

表 1 各ケースの内容と SS の排出率

ケース名	A-I	A-II	B-I	B-II	C-I	C-II	D-I	D-II
取水深度	10m		20m		30m		40m	
分画フェンス	無	有	無	有	無	有	無	有
排出率 (%) 全粒径	4	8	13	19	10	14	1	2
排出率 (%) $10\mu\text{m}$ 以下	9	17	27	41	22	31	2	4

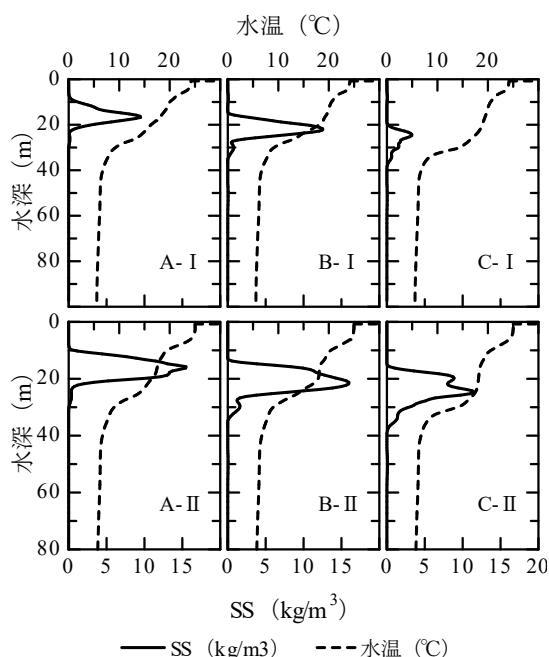


図 7 9 日後の取水口前での水温・SS 鉛直分布

貯水池三次元シミュレーションにおける湖上風の与え方が
水温・流速分布におよぼす影響

目次

第 1 章 序論

1-1	はじめに	1
1-2	既往の研究	
1-2-1	貯水池の施設と水質・流動	3
1-2-2	貯水池における濁水流動	3
1-2-3	貯水池での数値計算モデル	4
1-3	論文構成	5

第 2 章 研究方法

2-1	貯水地の概要	
2-1-1	流域の概要	6
2-1-2	貯水池の概要	6
2-2	観測の概要	12
2-3	サンプルの分析とデータ処理	
2-3-1	採取したサンプルの粒度分析	15
2-3-2	濁度から SS への変換	16
2-3-3	外部より入手したデータ	18
2-4	三次元シミュレーションの方法	
2-4-1	モデルの概要	19
2-4-2	初期・境界条件	23
2-4-3	水位と水温の精度検証	29

第 3 章 SS 沈降速度の減衰率の検討

3-1	現地観測データの整理	
3-1-1	水温・濁度データの時系列変化	31
3-1-2	洪水濁水の粒度分布	35
3-2	沈降速度の減衰率の作成	
3-2-1	stokes 式による沈降速度の算出	36
3-2-2	沈降速度の減衰率の作成	37
3-3	3次元流体モデルによる SS 沈降速度の検証	
3-3-1	計算条件と検証ケース	38
3-2-2	SS の再現性比較	40

第 4 章 施設運用の違いが SS 排出に及ぼす影響の検討	
4－1 計算条件と検証ケース	45
4－2 運用法の違いによる影響	
4－2－1 SS 排出率の検討	47
4－2－2 取水口前に置ける水温・SS の分析	49
4－3 運用法の違いによる影響	53
4－3－1 乱れのエネルギーの算出方法	54
4－3－2 乱れエネルギーの比較	55
第 5 章 結論	72
参考文献	73
謝辞	76

第1章 序論

1-1 はじめに

ダムは、洪水調節や利水を目的として建設され、大雨による洪水や浸水から下流の住民を守り、農業、工業、生活用水の安定的供給や水力発電による電力供給によって人々の生活を支えている。ダムの機能は地域ごとに異なり、また時代とともに変化している。

戦前、ダムは発電目的で作られたものが殆どであったが、戦後には大型台風の襲来によって生ずる大規模水害により治水の重要性が高まり、高度経済成長期には、都市人口の増大により水量確保を主な目的とした多目的ダムが建設されるようになった。近年では、人々の環境意識の高まりから、水質の悪化や、それに伴う景観阻害といった環境問題への評価も重要になってきた。

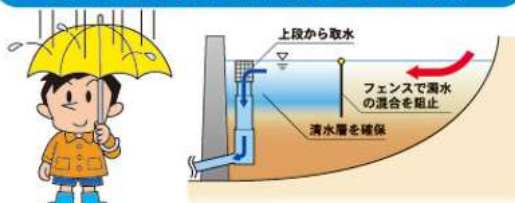
大型の貯水池は流入量が多い上、懸濁物質や溶解物質を滞留するため、濁水の長期化、土砂の堆積による貯水容量の低下といった問題が生ずる。そこで、濁水長期化の軽減を目的として、選択取水設備による濁水の早期放流が1990年代以降行われるようになってきている。一方、水質対策として、河川流入部のアオコを拡散防止するための分画フェンスが設置されるが、分画フェンスには湖内の水温や流動を変化させる効果があることが最近分かってきた。また、宮崎の矢作ダムでは、図1-1-1のように、取水口の表層・中層切り替えと分画フェンスを組み合わせることで濁水制御に取り組んでいる。そのため、選択取水設備と分画フェンスを組み合わせることで効率的にSSを排出できる可能性がある。そこで、設備を組み合わせる運用した際に、濁水の排出に与える影響について三次元モデルを用いて定量的に示すことが必要であると考えられる。

ここで、SS粒子の沈降速度については、理論式を用いても実際の沈降現象を再現できないことが知られており、例えば梅田らは確率沈降モデルを提唱している。しかし、SSの沈降速度は、濁水長期化や土砂堆積の検討に大きく影響するため、適切に表現することは重要である。

そこで、本研究では、多摩川上流の小河内貯水池を対象として、2019年9月9日の台風15号で発生した洪水による濁水の観測を行い、採水したサンプルの粒度・SS濃度を分析し、貯水池内のSS粒子の沈降速度の検討をした。次に、三次元流動シミュレーションを用いて、沈降速度の与え方による再現性の検討を行った上で、選択取水設備と分画フェンスの運用法の違いがSSの排出率に与える影響についてケーススタディーを行った。

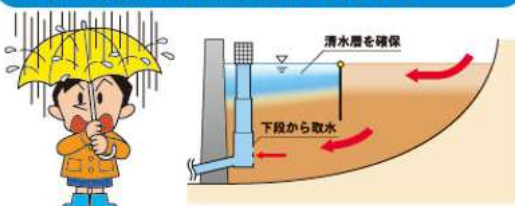
分画フェンスは選択取水設備と併せて以下のように運用します

1 雨が降っています。
濁った水が少しずつダム湖に溜まりはじめています。



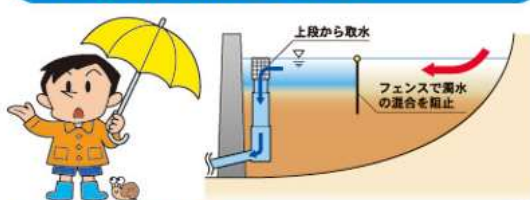
少ない出水であれば、濁水をダム湖上流に溜め込み、上段の取水口を使って清水層から濁りのない温かい水を放流します。

2 たくさんの雨が降り、
大量の濁った水がダム湖に流れ込んでいます。



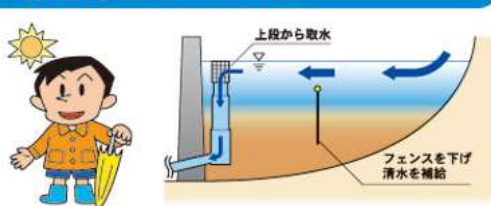
大きな出水の場合、下段から早期に濁水を放流し清水層の確保を図ります。

3 雨が止みました。
でも、流れ込む水はまだ濁っています。



出水後は、下流の影響を考えて上層の清水を取水するために、下段取水から上段取水に切り替えます。

4 雨はすっかり上がり、
流れ込む水もきれいになりました。



流入水が清水化した時点でフェンスを沈め、フェンス内の上層に清水を補給します。

図 1-1-1 矢作ダム管理事務所の HP

1-2 既往の研究

1-2-1 貯水池の施設と水質・流動

選択取水設備に関しては、堀田ら（2002）は、選択取水設備を用いて水温躍層を低下させることによって、濁水長期化現象の生起流量を大きくすることが可能であることを示した。新山ら（2010）は小河内貯水池の第2取水施設（選択取水施設）の流動特性や放流水室の現地観測を行い、取水のゲート位置によって水温構造が変化することや堤体での水質データを元に放流水室を予測できることを示した。牧野ら（2007）は同貯水池の選択取水設備の運用が植物プランクトンの成長に及ぼす影響について述べた。矢島ら（2010）は殿ダムにおいて、平常時は異高同時取水、出水時には常時表層取水を行っている成層状態に対する出水時対応が望ましいと示した。

分画フェンスに関しては、D.G.Nimal Priyantha ら（1997）は寺内ダムにおいて鉛直一次元モデルと生態系モデルから分画フェンスによって表層の Chl-a 濃度を低下させる効果を検討した。秋山ら（2006）が、緩勾配を含む広範囲の水路床実験を行い、初期混合率や潜入部での内部フルード数を明らかにした。新山ら（2010）は分画フェンスが河川流入水に及ぼす影響やフェンス上流部で濁水が滞留することを示した。

以上のように、施設単体における検討は数多くあるが、複数の施設を組み合わせた際の効果検討に関する研究はあまり行われていない。

1-2-2 貯水池における濁水流動

濁水浸入流についての研究は、国内外において室内実験や現地観測による研究が多く行われている。室内実験では、Herbert ら（1979）は潜入密度流の理論的な解析を行い、潜り込み水深の算定式を提案している。また福岡ら（1980）は成層貯水池に潜入する濁水挙動を水槽実験により調べ、中層密度流の流動特性及び先端形状と先端移動速度を明らかにしている。現地観測では、吉川・山本（1971）が小河内貯水池において水温の季節変動及び濁水層の発生機構について検討を行い、河川水が貯水池の同一水温層に流れ込むことや濁水層の発生は洪水時及び水位の低下時であることを明らかにしている。

洪水時に発生する濁水の研究としては、齋藤ら（1998）は二風谷ダムにおいて流下土砂が河床付近で高濃度の泥流と鉛直方向に混合した浮遊状態で流下していることを明らかにしている。このように、濁水の密度流としての挙動はよく知られている。

濁水に含まれる SS 粒子の、水中での沈降に関する現地調査、室内実験は多く行われてきた。現地調査では、日比野ら（2008）は広島湾において、有機懸濁物質の密度、粒径の時間変化の予測式を提案し、これに対応する沈降速度を推定した。早川ら（2012）は小河内貯水池にて、水深別に濁質の沈降量と沈降物の性状を調査し、濁質の挙動を推定

している．室内実験としては沈降筒を用いた方法や画像解析法，レーザー回折式粒度分布計による測定が挙げられる．細川ら（1982）は，沈降筒を用いた実験で，粒径平均の沈降速度が求めている．また，金山ら（1991）は採取したサンプルの土砂濃度と粒度分析を同時に行うことにより，粒径ごとの沈降速度を求めている．レーザー回折式粒度分布計を応用した方法として，小枝ら（2010）はセディメントトラップにより採取した試料を粒度分布計の分析セルに注入し，粒度分布と光強度を連続的に測定することにより，粒子径ごとの沈降速度を求めている．また，岡村ら（2012）は，フロックを構成する粒子の直径と個数から形状を算出し，直接測定した沈降速度と形状を与えることで微細有機泥粒子の密度を推定する手法を検討した．

また，粒子の数値解析に関しては，梅田ら（1999）は七ヶ宿貯水池において洪水時の濁水挙動の現地観測を行い，流入濁水が傾斜ブルームとして斜面上を流れ下りた後に水温躍層に沿って水平に浸入する流入機構を示し，濁水流動及び濁質堆積過程現象を $k-\varepsilon$ による 3 次元流動シミュレーションによって再現している．また，梅田ら（2004）は，粒子の沈降を流動シミュレーションで再現するにあたり，確立的沈降というモデルを提唱した．

以上のように，観測や実験から沈降速度を推定する研究は数多く行われているが，ストークス式の値よりも沈降が遅くなる原因については，明らかにされていない．

1-2-3 貯水池での数値計算モデル

貯水池を対象とした数値計算モデルについては，自然湖沼とは異なり流下方向に細長い傾向のある貯水池形状や計算時間を考慮して，鉛直 1 次元モデルや鉛直 2 次元モデルが広く用いられている．例えば，森北（1987）は貯水池の流動と水温・濁度の 2 次元数値解析モデルを，有限要素法と差分法により離散化した 2 つのモデルで開発し，実貯水池に適応した計算結果と観測結果の比較を行っている．北澤ら（2008）は湖水流動モデルとして支川合流型の鉛直 2 次元モデル，水質モデルとしてクロロフィル a ，リン，窒素，COD，溶存酸素に着目してアオコの浮沈現象を組み込んだモデルを提案している．

三次元モデルについては，新谷・中山（2009）は環境流体解析を目的としたオブジェクト指向型のモデルを構築し，網走湖において計算精度と実用性についての検証を行っている．S.Chung ら（2009）は韓国のテチョン貯水池において 3 次元モデルを適用し，貯水池内の水温変動や洪水時の濁水挙動について検証している．李ら（2007）は中規模貯水池で数値解析を行い，中層で渦が形成され表層との間にせん断力が生じて鉛直混合が起こるという結果を得ている．松永（2018）は，三次元流体シミュレーションを行い，風の入力条件が貯水池の水温・鉛直分布の再現性及ばす影響について検討を行った．

以上のように，モデルを使用した研究は近年増加しており，貯水池の流動・水質を適切に表現するために，数値計算は重要なものであると言える．

1-3 論文構成

本研究では、多摩川上流の小河内貯水池を対象として、2019年9月9日の台風15号で発生した洪水による濁水の観測を行い、採水したサンプルの粒度・SS濃度を分析し、貯水池内のSS粒子の沈降速度の検討をした。次に、三次元流動シミュレーションを用いて、沈降速度の与え方による再現性の検討を行った上で、選択取水設備と分画フェンスの運用法の違いがSSの排出率に与える影響についてケーススタディーを行った。

本論文は全5章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、本研究の目的と、既往の研究、及び本論文の構成について述べる。

第2章は、研究対象地である小河内貯水池についての概要と、解析に用いたデータについて述べる。また、使用した三次元流体モデルの基礎方程式や、初期条件及び境界条件について述べる。

第3章では、洪水後の貯水池内の観測データ、サンプルの分析結果を示す。そして、三次元流動シミュレーションを用いて、SSの沈降速度の与え方による再現性を、観測値と比較して検討を行う。

第4章では、三次元流動シミュレーションを用いて、施設の運用法が貯水池の水温、SS流動に与える影響についてケーススタディーを行う。

第5章では、結論と今後の課題について述べる。

第2章 研究方法

2-1 貯水池の概要

2-1-1 流域の概要

図 2-1-1 に本研究の対象地である小河内貯水池の位置を示す。小河内貯水池（奥多摩湖）は多摩川水系多摩川を堰き止めた人造湖で、東京都水道局が管理する水道専用貯水池である。山梨県と埼玉県の間境に位置する笠取山山頂（1953 m）の南斜面下にある水干を水源としており、山梨県の柳沢峠より流れる柳沢川と合流し丹波川と名前を変え、小河内貯水池へ流入している。

小河内貯水池の流域（図 2-1-2）は甲州市、小菅村、丹波村および奥多摩町の 4 市町村にまたがっており、丹波川流域、小菅川流域、後山川流域、峰谷川流域と残流域からなる。流域面積は 262.9 km² であり、丹波川、小菅川、後山川、峰谷川の 4 河川が流入水量のおよそ 8 割を占めている。

後山川を除いた 3 河川の上流にはそれぞれ集落が存在しており、これらの流域は人口や産業が多く、様々な観光レクリエーションが展開されている。その結果、河川への人為的な要因による水質汚濁が顕著である。そこで東京都水道局は対策として、観光施設や地元自治体と水質保全に関する協定を結び、河川の浄化施設や下水処理施設の設置、砂利採取などを行っている。

2-1-2 貯水池の概要

小河内貯水池の諸元を表 2-1-1 に示す。小河内ダムは堤高 149.0 m、堤高長 353.0 m という、日本最大級の規模を持つ重力式コンクリートダムである。標高 530 m の山岳地帯に造られたダムであるため、貯水池は複雑な形状を呈しており、全体としては東西方向に広がっている。湛水面積は 4.25 km²、湛水延長は 13.87 km、最大湖幅は約 750 m、最大水深は 142.5 m、有効貯水容量は 1 億 8540 万 m³ である。小河内貯水池に流入した水は、貯水池内で平均 240 日ほど滞留し、年平均回転率は 1.5 程度と長い。

図 2-1-3 に、小河内貯水池における諸施設の位置関係を示す。

図 2-1-4 に、小河内貯水池におけるダム堤体に設置されている取水施設の模式図を示す。小河内ダムでは当初、第 1 号取水施設からの中層放流が行われていたが、夏季に貯水池から流入河川よりも低水温の水が放流され、その冷水が多摩川のアユ生育に影響をおよぼすことが指摘されるようになった。そこで東京都水道局は、小河内ダム堤体に

第2号取水施設を設置し、平成4年から表層取水に変更した。図2-1-5に、第2号取水施設の外観を示す。

しかし、取水方法の変更により貯水池内の水温特性が変化し、藍藻類が繁殖して水の華と呼ばれるアオコが異常発生した。また平成13年にはダム放流水より、かび臭の原因物質が確認された。そこで、東京都水道局は対策として、分画フェンスの設置が行われた。分画フェンス（図2-1-6）は、横断方向に不透過性のシートを垂らしたもので、アオコ発生の主要因である栄養塩を多く含んだ河川水を底層へ誘導する働きを持つ。貯水池上流部に設置されており、丹波川・小菅川・峰谷川の流入部に高さ10 mの第1フェンス、丹波川・小菅川の上流部に高さ2 mの第2フェンスが存在する。

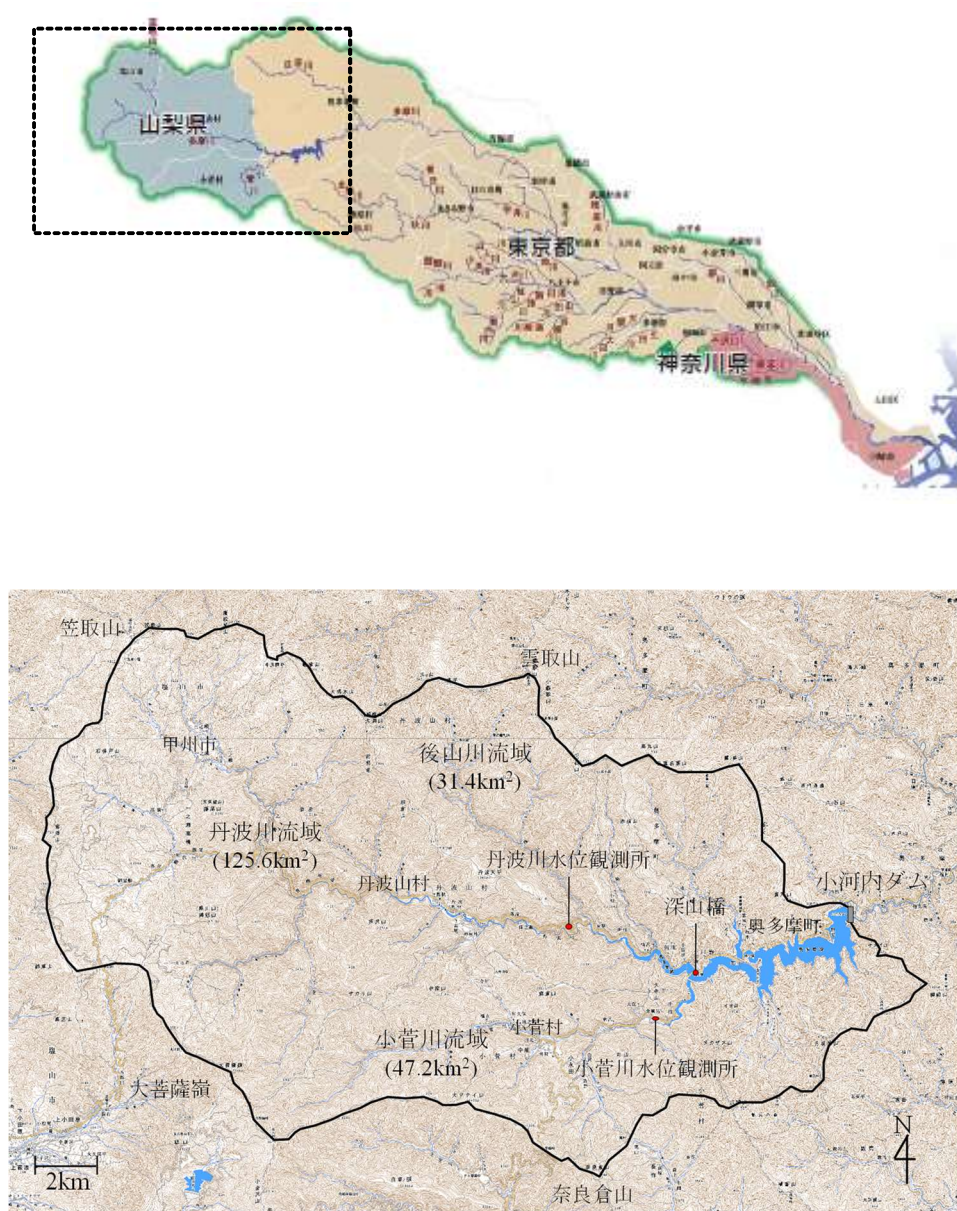


図 2-1-1 小河内貯水池位置と流域の概要

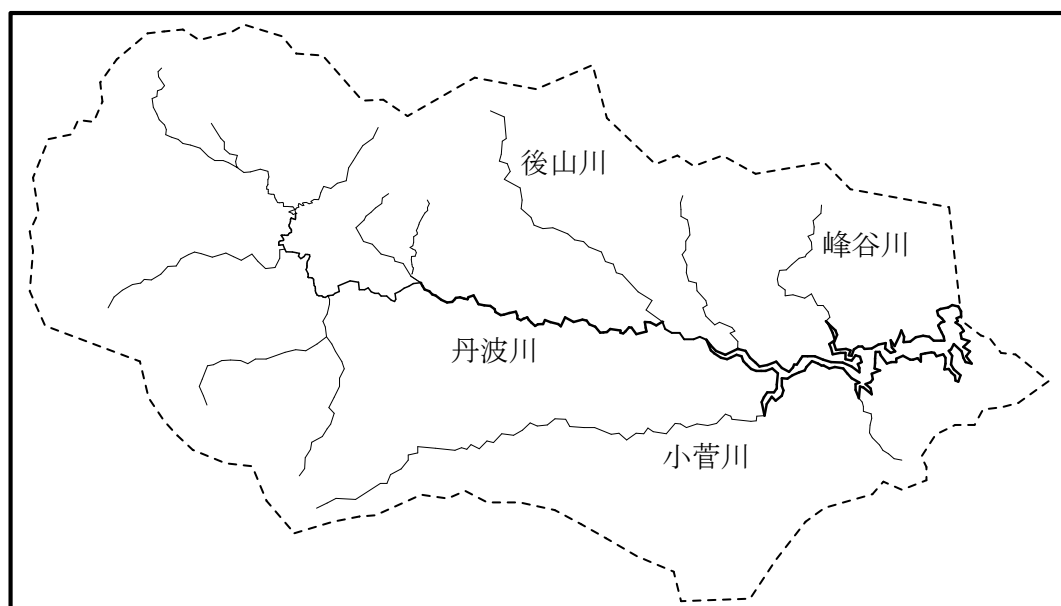


図 2-1-2 流域図

表 2-1-1 小河内貯水池の緒元

総貯水容量	189,100,100 m ³
有効貯水量	185,400,100 m ³
流域面積	262,9 km ²
湛水面積	4.25 km ²
湛水周長	45.37 km
湛水延長	13.87 km
常時満水位	101.5 m (EL.526.5m)
予備放流水位	97.7 m (EL.522.7m)
第二取水下端	65.0 m (EL.490.0m)
第一取水管	28.0 (EL.453.0m)

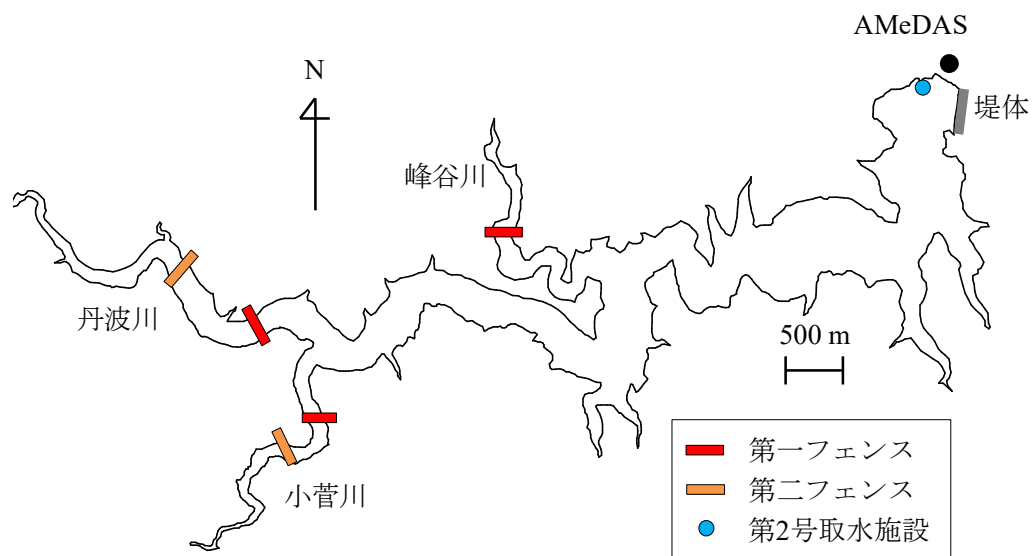


図 2-1-3 小河内貯水池の諸施設

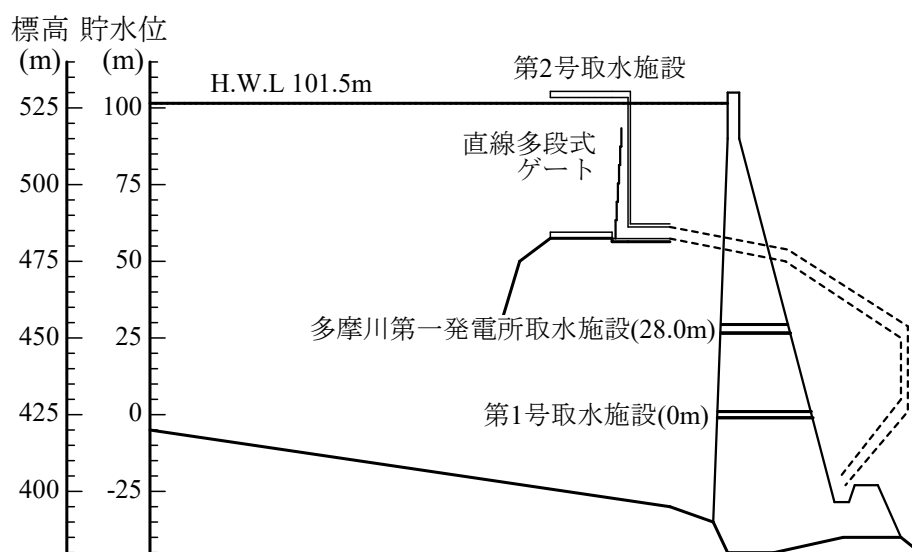


図 2-1-4 小河内ダムの取水機構



図 2-1-5 第 2 号取水施設



図 2-1-6 分画フェンス

2-2 観測の概要

小河内貯水池における、台風15号で発生した洪水濁水の特性を把握するため、9月10、13、17、24、30日において、4地点で水温・濁度の鉛直分布を測定し、2地点で濁水層からサンプルを摂取した。図2-2-1に観測地点と項目を示す。観測は計4地点あり、st1とst2の間に2mの分画フェンス、st2とst3の間に10mの分画フェンスが存在している。

貯水池の水質測定には、図2-2-2に示す多項目水質計（JFEアレックス社製、AAQ1180s-PRO）を用いた。多項目水質計の諸元を表2-2-1に示す。計測は、PCとケーブルでつながった多項目水質計本体を20cm/s程度の速さで水面から下ろし、計器が湖底に着底するまで行った。各ステーションで使用した多項目水質計は0.2秒間隔で測定を行った。本論文では、得られたデータを0.1mまたは0.5m毎に平均してグラフに描画している。

St2、St4において、多項目水質計によって観測した際に、濁度が高い濁水層において、サンプルの採取を行った。サンプルの採取には、図2-2-3に示すバンドーン採水器を用いた。

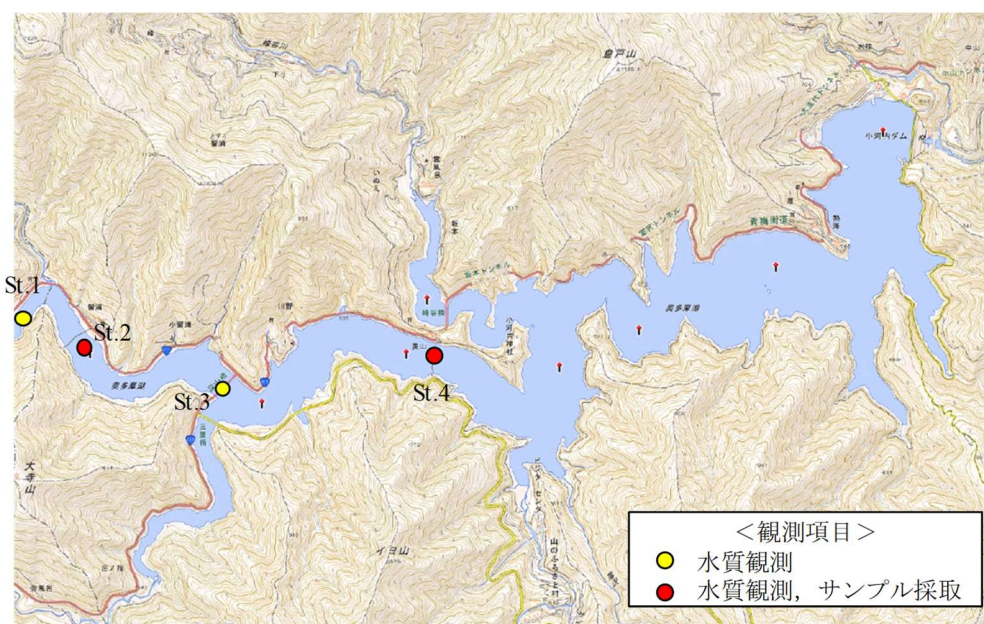


図 2-2-1 観測地点とその項目



図 2-2-2 多項目水質計

表 2-2-1 多項目水質計の諸元

多項目水質計			
	深度	水温	濁度
製品名	JFE アレック社製 AAQ1180s-PRO		
形式	半導体圧力センサー	サーミスタ	赤外線後方錯乱式 (LED)
測定範囲	0 ～ 100 m	-5 ～ 40 ℃	0～1000 FTU
分解能	0.002m	0.001℃	0.03 FTU
精度	±0.3%FS	±0.02℃	±0.3 FTU or ±2 %



図 2-2-3 バンドーン採水器での採水の様子

2-3 サンプルの分析とデータ処理

2-3-1 採取したサンプルの粒度分析

採取したサンプルの粒度分布を知るため、レーザー回折式粒度分析装置（図 2-3-1）を用いて分析を行った。

使用器具：レーザー回折式粒度分析装置（島津製作所 SALD-3100）

作業手順：

1. 装置内を蒸留水で満たし、グラフがブランク領域に入っていることを確認する。
メスシリンダーに試料を入れ均一にかき混ぜ、ピペットで試料を抜いて、蒸留水で満たされている装置に投入する。
2. 棒グラフが測定領域に入っていることを確認する。グラフが測定領域よりも高い場合は蒸留水を追加して薄め、低い場合には試料を入れて濃度を上げる。
3. 棒グラフが安定したところで測定を行う。誤差を減らすため同サンプルで測定を数回行い、分布が酷似したデータを採用する。



図 2-3-1 粒度分析装置

2-3-2 濁度から SS への変換

多項目水質計により測定した濁度は、赤外後方散乱方式で測定された浮遊物量の相対値であるため、現地河川水中の浮遊土砂（SS）濃度に変換する必要がある。そこで、現地で採水した水中の SS 濃度と、多項目水質計で得られた濁度の値から回帰式を作成した。水中の SS 濃度の測定は、ガラス繊維濾紙（φ47mm, GF/F, Whatman）を用いて吸引濾過し、濾紙上に残った懸濁物質の重量を計測し、通水量で除することで算出した。以上により求めた SS 濃度と濁度の回帰式を、切片を 0 にして作成した。その結果、濁度に 0.3458 を掛けて SS の値とした。図 2-3-2 に貯水池での濁度と SS の相関図を示す

$$SS = 0.3458 \cdot turb \quad (2-3-1)$$

SS : 変換濁度 (mg/l)

turb : 多項目水質計での観測濁度 (FTU)

また、河川部では貯水池部との粒度組成が異なるため SS 変換式が変わる。既往の研究より、濁度 (ppm) から SS (mg/l) への変換式が得られており、水道局の濁度を SS に変換する際は過去に行った河川の濁度との相関を取り、相関係数を乗じた後に換算式 (2-3-2) に当てはめた。多項目水質計の濁度 (FTU) から変換に用いた濁度 (ppm) への換算には既往の研究から式 (2-2-3) を用いた。図 2-3-3 に河川での濁度と SS の相関図を示す。

$$SS = 0.01 \cdot turb^2 + 0.6 \cdot turb \quad (2-3-2)$$

$$turb = 0.894 \cdot turb_3 \quad (2-3-3)$$

SS : 変換 SS (mg/l)

turb : 濁度計での観測濁度 (ppm)

turb₃ : 河川での観測濁度 (FTU)

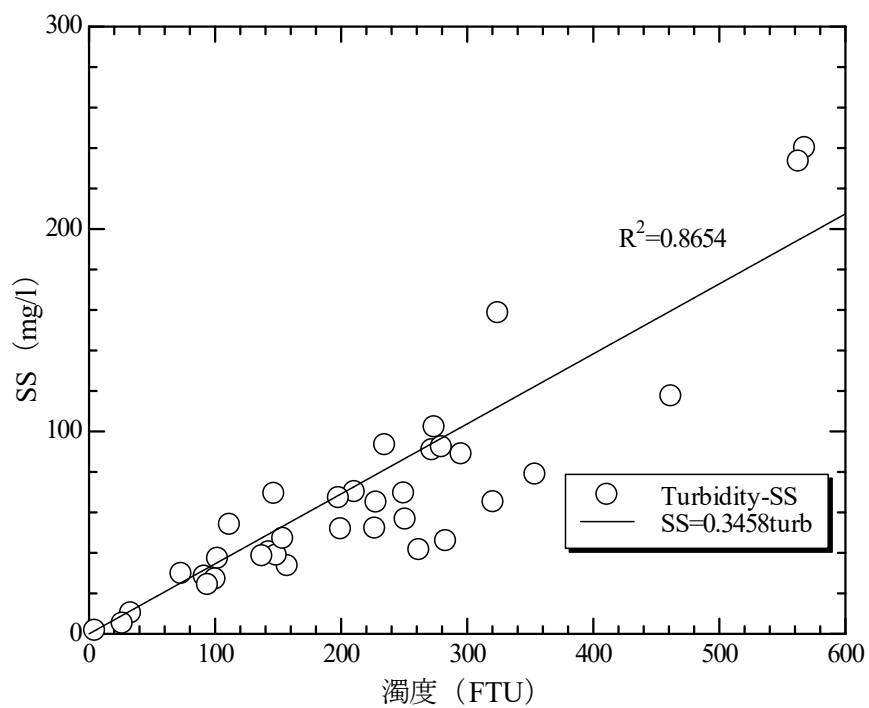


図 2-3-2 濁度-SS 相関図

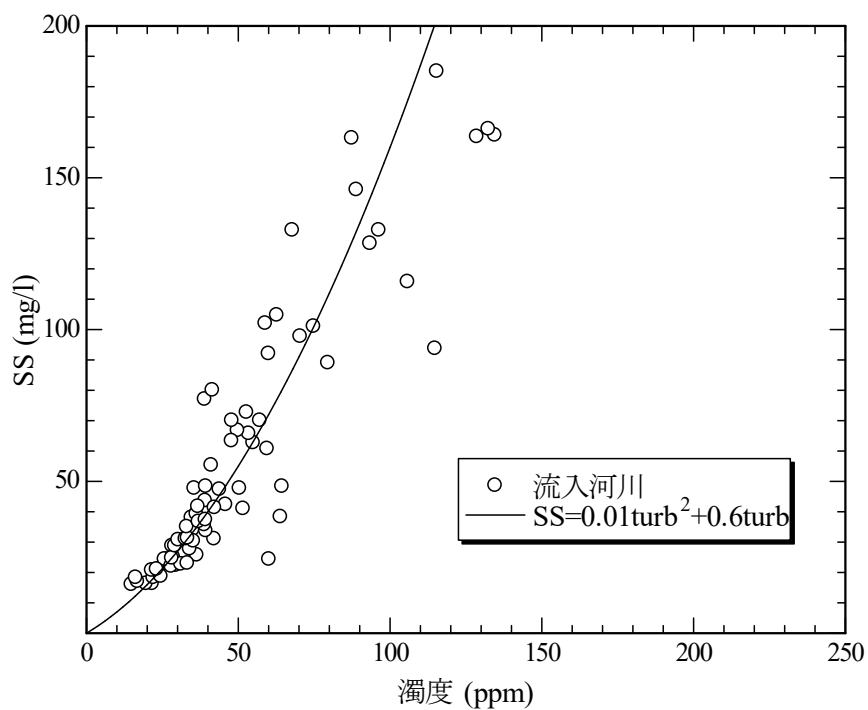


図 2-3-3 河川での濁度-SS 相関図

2-3-3 外部より入手したデータ

気象庁データベース (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>) より、小河内 AMeDAS が観測した気象データを入手した。観測項目は降水量 (mm)、気温 (°C)、風向・風速 (m/s)、日照時間 (h)、降雪量 (cm) および積雪量 (cm) である。風向の観測値は全 16 方位であり、例えば北東、西北西といった表現で示されている。本研究では、1 時間間隔のデータを取得して解析を行った。

また、東京都水道局よりダム堤体付近の観測点における鉛直水温のモニタリングデータを頂いた。データ間隔は 1 時間であり、表層から 30 m までが 1 m ピッチ、それ以深は 10 m ピッチで計測されている。

2-4 三次元シミュレーションの方法

2-4-1 モデルの概要

本研究で使用したモデルは、新谷（2017）が開発した **Fantom Refined** である。本シミュレーターは、支配方程式に現れる各項の役割を独立したパーツ（オブジェクト）に分担し、局所的に高解像度化（**Local Mesh Refinement: LMR**）させることができ、複雑なアルゴリズムを柔軟に再現することができる。

このモデルの基礎方程式は、質量（流体）保存式である連続式 (2-1)、非圧縮フジネクス近似を施した三次元 **Navier-Stokes** 式 (2-2) ～ (2-4)、自由水面の変動を記述する式 (2-5)、および熱輸送の方程式 (2-6) である。SS の輸送方程式を (2-7) に示す。式離散化手法は、コロケート格子有限体積法であり、時間進行は2次精度、移流項は3次精度としている。また、非静水圧・静水圧の両者に対応しており、本研究では静水圧を採用した。鉛直方向の渦粘性・渦拡散係数の算定には、一般化された2方程式乱流モデルである **GLS** 乱流クロージャーを用いた。この2方程式は多くの選択肢があるが、本研究では **K-OMEGA** と安定化係数を採用した。**GLS** 乱流クロージャーの詳細は、新谷（2016）を参照されたい。水位低下時には、水面位置にある鉛直セル内の水位が限界水位（以下：**limit-depth**）よりも下回った場合、1つ下のセルと結合する（図 2-4-1）。水位上昇時には、**limit-depth** を水位が下回っている場合、水面位置にある鉛直セルは1つ下のセルと結合されているが、水位が **limit-depth** を超えると、セルは分裂する。このように、水面位置にある鉛直セルを水面変動に伴って結合・分裂させ、水域の変化を再現した。また、鉛直方向の空間離散化には、パーシャルステップが組み込まれている。

(1) 連続式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-1)$$

ここで,

u, v, w : それぞれ, x, y 方向 (水平) および z 方向 (鉛直) の流速

(2) 基礎方程式 : 3 次元 Navier-Stokes 式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f_v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f_u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_H \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_H \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_V \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{g}{\rho_0} (\rho_0 + \rho) \quad (2-4)$$

ここで,

ρ_0 : 参照密度, $\rho_0 + \rho$: 密度

$F_x (= 2\omega \sin \varphi)$: コリオリ係数 (φ : 緯度, ω : 角速度)

v_H : 水平方向の渦粘性係数, v_V : 鉛直方向の渦粘性係数

(3) 自由表面の式

$$\frac{\partial \xi}{\partial y} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-h}^{\xi} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-h}^{\xi} v dz \right) \quad (2-5)$$

ここで

ξ : 水面変動

(4) 熱収支の式（水温の輸送方程式）

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{\mu}{S_c} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{\mu}{S_c} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left(\frac{\mu}{S_c} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial z} \right\} \quad (2-6)$$

ここで

T : 水温 (°C)

μ, μ_t : 動粘性係数, 渦動粘性係数

S_c, σ_t : シュミット数, 乱流シュミット数

(5) SS の輸送方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial SS}{\partial t} + u \frac{\partial SS}{\partial x} + v \frac{\partial SS}{\partial y} + (w + w_0) \frac{\partial SS}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \left(\frac{\nu}{S_c} + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial SS}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \left(\frac{\nu}{S_c} + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial SS}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \left(\frac{\nu}{S_c} + \frac{\nu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial SS}{\partial z} \right\} \end{aligned} \quad (2-7)$$

SS : SS 濃度

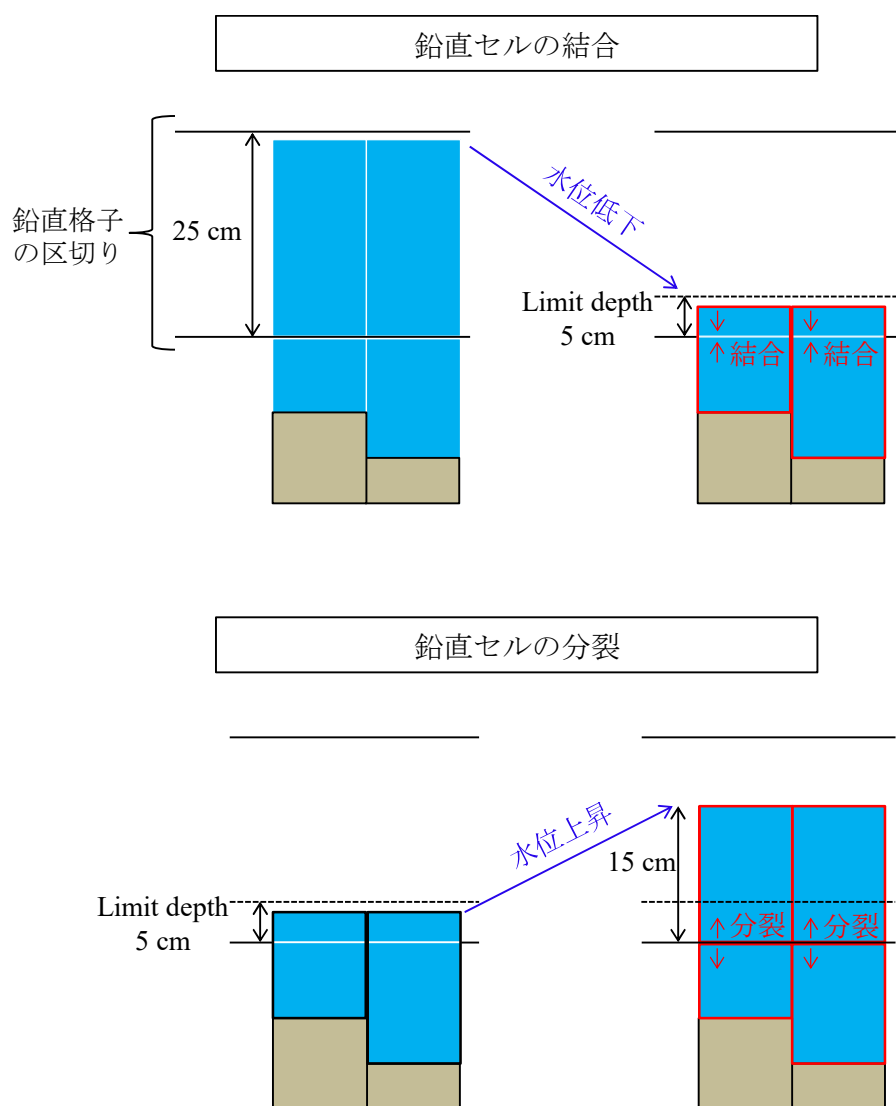


図 2-4-1 鉛直セルの取り扱い

2-4-2 初期・境界条件

(1) 検証期間

計算期間は2019年9月7日から9月30日とし、最初の3日間は助走期間とした。

(2) 初期条件

① 地形グリッド

鉛直グリッド（図2-4-2）は、低層から40 mまでを5 m、40 m～45 mまでを2 m、45～60 mまでを1 m、60～98 mまでを0.5 m、それ以浅を0.25 mとした。

貯水池の三次元計算を行う際に使用される水平方向のグリッドサイズは、求める計算の内容や結果によっても異なるが、湛水面積などの貯水池規模に応じて決められる。

S.CHANG ら（2009）は湛水面積 72.8 km² の Daechong Reservoir において 150 m グリッドを用いている。小河内貯水池は湛水面積が 4.25 km² であり、貯水池幅が広いところでも 750 m 程度であり地形も複雑であるため、本研究では 50 m とした。図2-4-3に、水平グリッドを示す。

グリッドデータは、東京都水道局より頂いた横断測量データおよび、過去に魚群探知機を用いて測量したデータを用いて補間計算を行い、各グリッドの水深を求めて作成した。

② 分画フェンスについて

分画フェンスは、丹波川の第1フェンスと第2フェンスに該当する位置において（図2-4-3）再現した。

③ 初期水温

初期水温分布は、2019年9月7日のものを使用した（図2-4-4）。

④ SS の分類と流入割合

表2-3-1に計算で用いたSSの粒形を示す。台風15号で採水した貯水池内のSS粒径の内、5%を超える割合の高い粒形を中心に11に分けて計算を行った。各粒径に対する流入河川での含有割合は、2008年に流入河川で観測されたSSの粒度分布を元にして決定した。この流入河川の含有割合を総SS流入量に乗じて、粒径ごとのSS流入量を求め、計算に使用している。各粒径の沈降速度については、第3章で述べる。

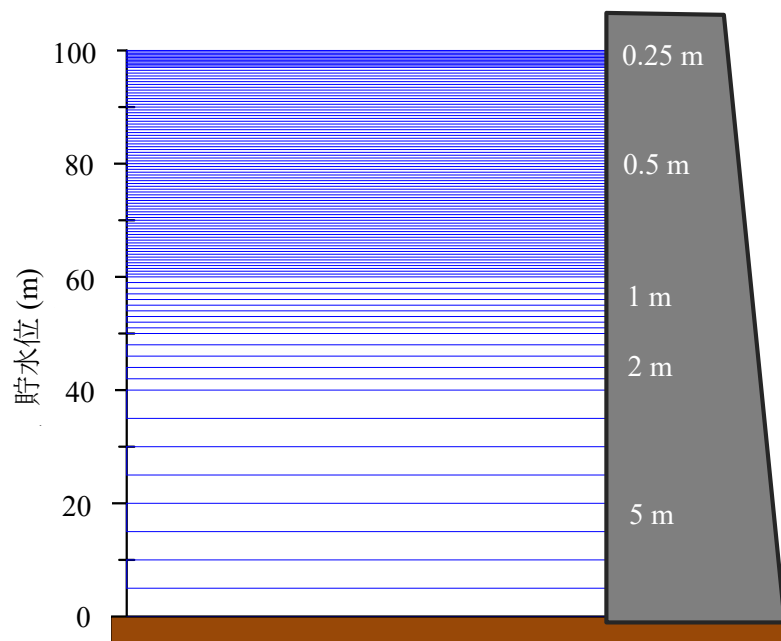


図 2-4-2 鉛直グリッド

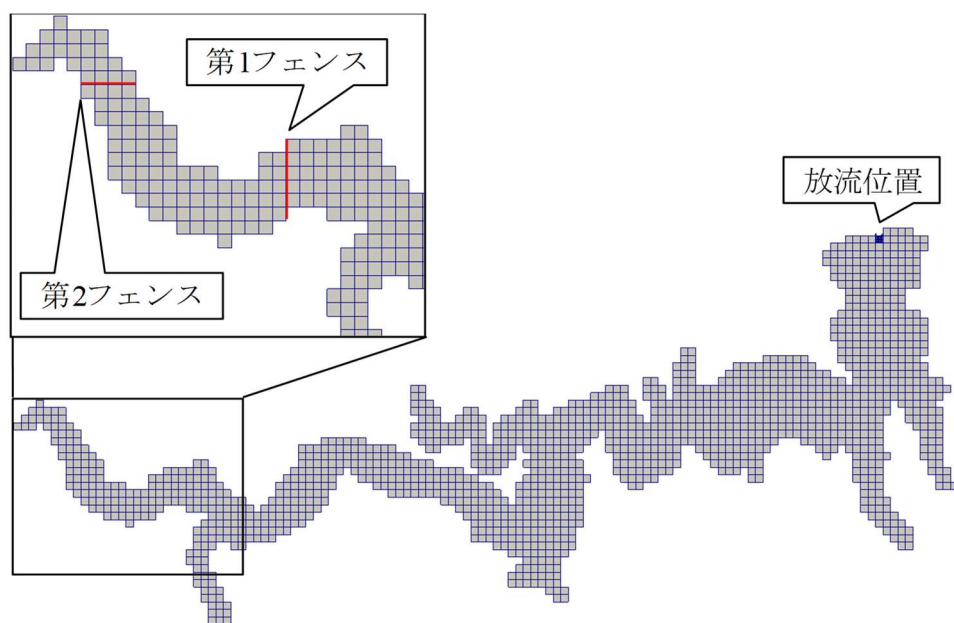


図 2-4-3 水平グリッド

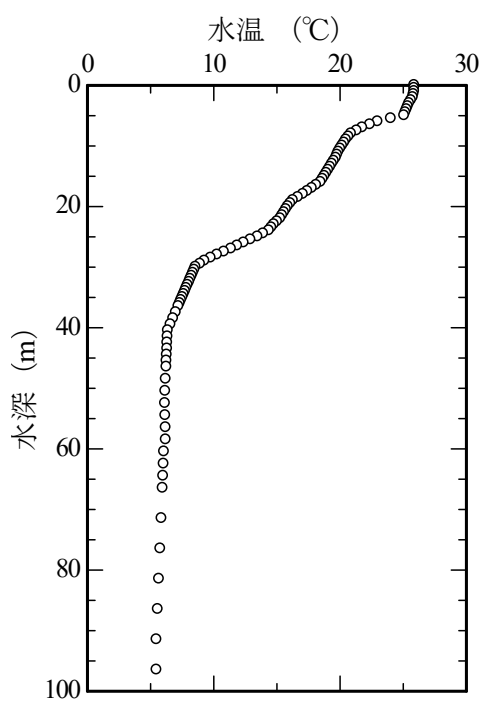


図 2-4-4 初期水温

表 2-4-1 SS の分類と含有割合

粒径 (μm)	代表粒径 (μm)	貯水池内での 含有割合 (m/day)	流入河川での 含有割合 (%)
2.625 以下	2.625	29.0732	24.72667
3.271	3.271	7.4289	3.00267
4.076	4.076	7.3619	3.34167
5.079	5.079	7.7077	3.62867
6.329	6.329	8.2671	3.6286
7.887	7.887	9.1370	4.161
9.828	9.828	9.0106	4.38
12.247	12.247	6.5829	4.68767
15.262	15.262	5.3273	5.04967
19.018	19.018	4.1060	5.3813
23.699 以上	23.699	5.9976	37.7227

(3) 境界条件

① 気象データ

気象データとして入力する項目は、気温（℃）、湿度、短波放射（W/m²）、風速（m/s）、風向（度）、大気圧（Pa）、雨量（mm）および雲量（0 - 1）である。気温、湿度、大気圧、雨量、雲量のデータについては気象庁データベース

（<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>）の値を用い、その他は東京都水道局のデータを用いた。ただし、雲量については小河内 AMeDAS では観測されていないため、東京の雲量データを与えた。データの入力ステップは1時間とした。図 2-4-5 に、入力した気象データを示す。

② 流入データ

河川からの流入は、丹波川（後山川を含む）、小菅川、峰谷川の流量および水温データ（東京都水道局）を与えた。入力データの時間ステップは1時間とし、各河川位置において鉛直一様に流入量を与えた。図 2-4-6 に、流入条件を示す。

なお、河川流量と放流流量の水収支とは貯水容量が一致しなかったために、河川流量と放流流量の水収支とは貯水容量の関係から補正係数を算出し、洪水時（9/9 1:00～9/11 14:00）は、各河川一律に乗じて補正し、そのほかは差を引いて算出した。

SS の総流入量については、東京都水道局で観測している河川での濁度データ（FTU）を SS（kg/s）に換算して算出し、各粒径の流入河川での含有割合に基づいて割り振った。

③ 放流データ

放流の境界条件として、東京都水道局の第2号取水施設における放流データを用いた。図 2-3-6 に放流条件を示す。

放流位置については、グリッドデータ上で第2号取水施設に該当する位置において再現した。放流水深については、放流データのゲート水深を中心として、上下3セルで放流を行った。ゲート水深は、時間の推移によって変化するため、放流水深もゲート水深から算出し、時間とともに推移するように設定した。

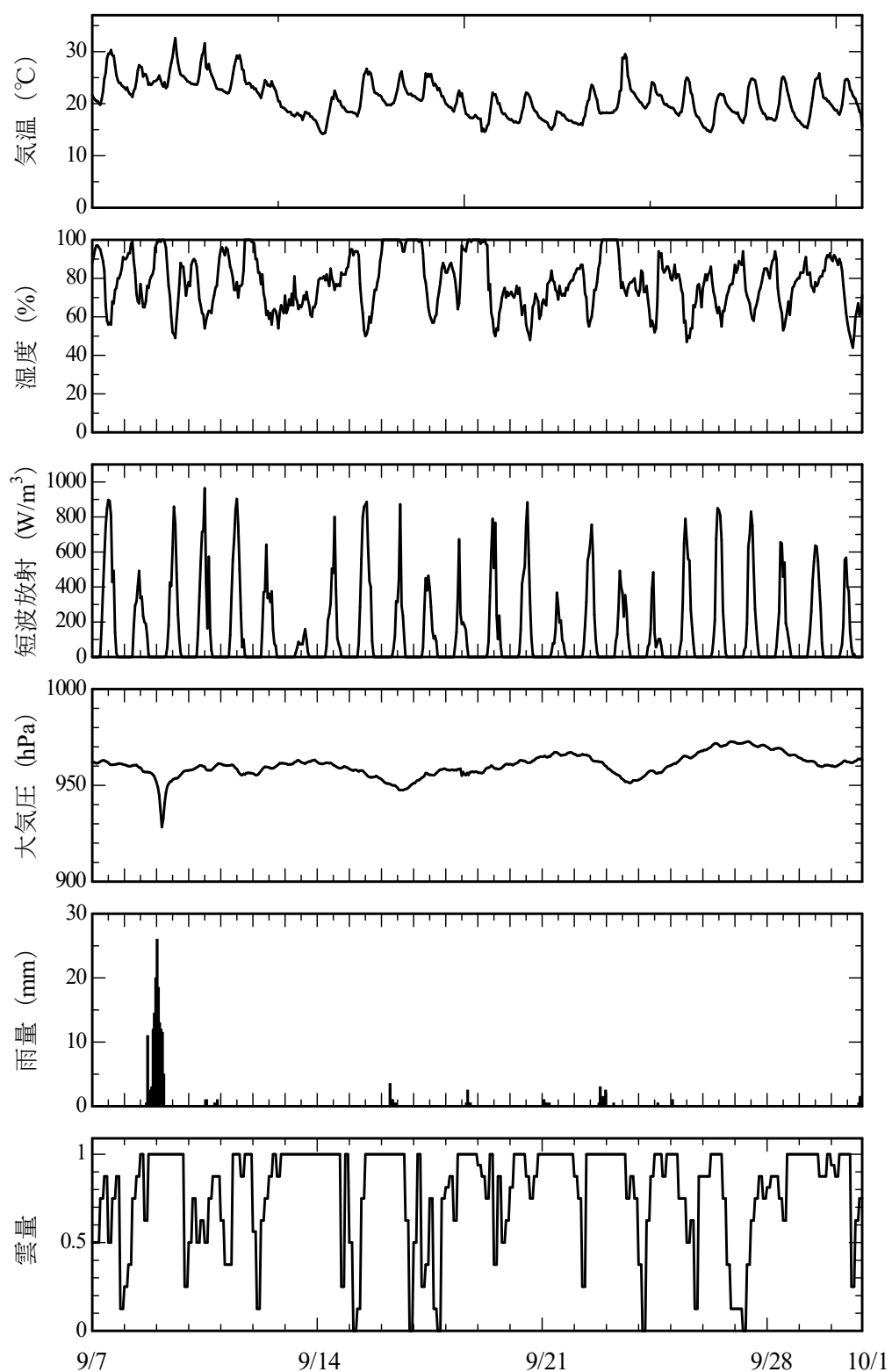


図 2-3-5 気象データ (2019 年 9 月 7 日~9 月 30 日)

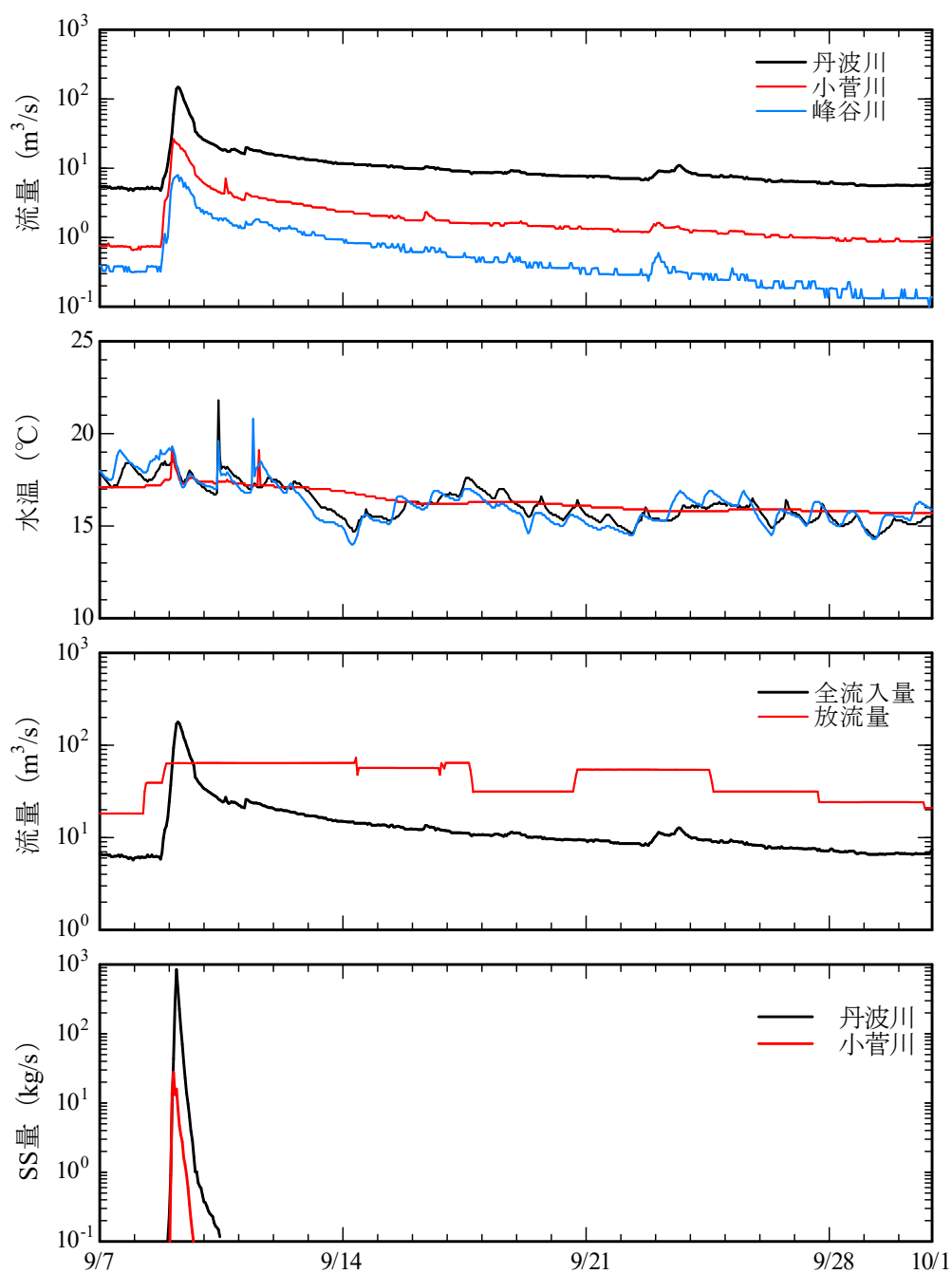


図 2-3-6 流入・放流条件 (2015 年 8 月 1 日~8 月 10 日)

2-4-3 水位と水温の精度検証

計算結果の水位の精度検証を図 2-4-7 に、水温の精度検証を図 2-4-8 に示す。

水位の精度検証では、計算で得られた結果と東京都水道局より入手した水位データを比較している。実測値と計算値の差は最大で 20 cm 程度となり、水位を良好に再現することができた。

水温の精度検証では、計算で得られたダム堤体前における水温の鉛直分布と東京都水道局より入手したダム堤体付近における水温鉛直分布を比較している。水温躍層位置、表層水温及び底層水温を良好に再現できている様子が確認できる。

これらから、貯水池の水温分布を十分に再現できており、SS の検証に十分であると判断した。

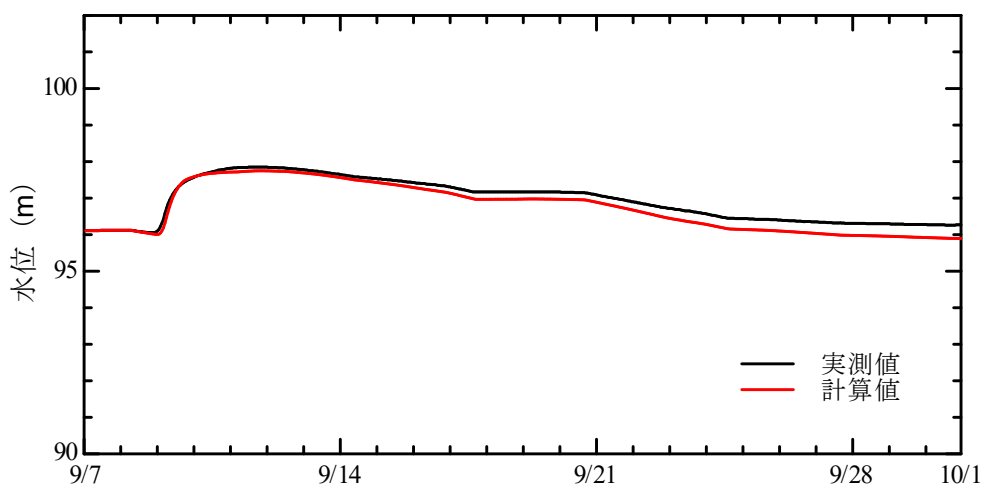


図 2-4-7 水位の精度検証

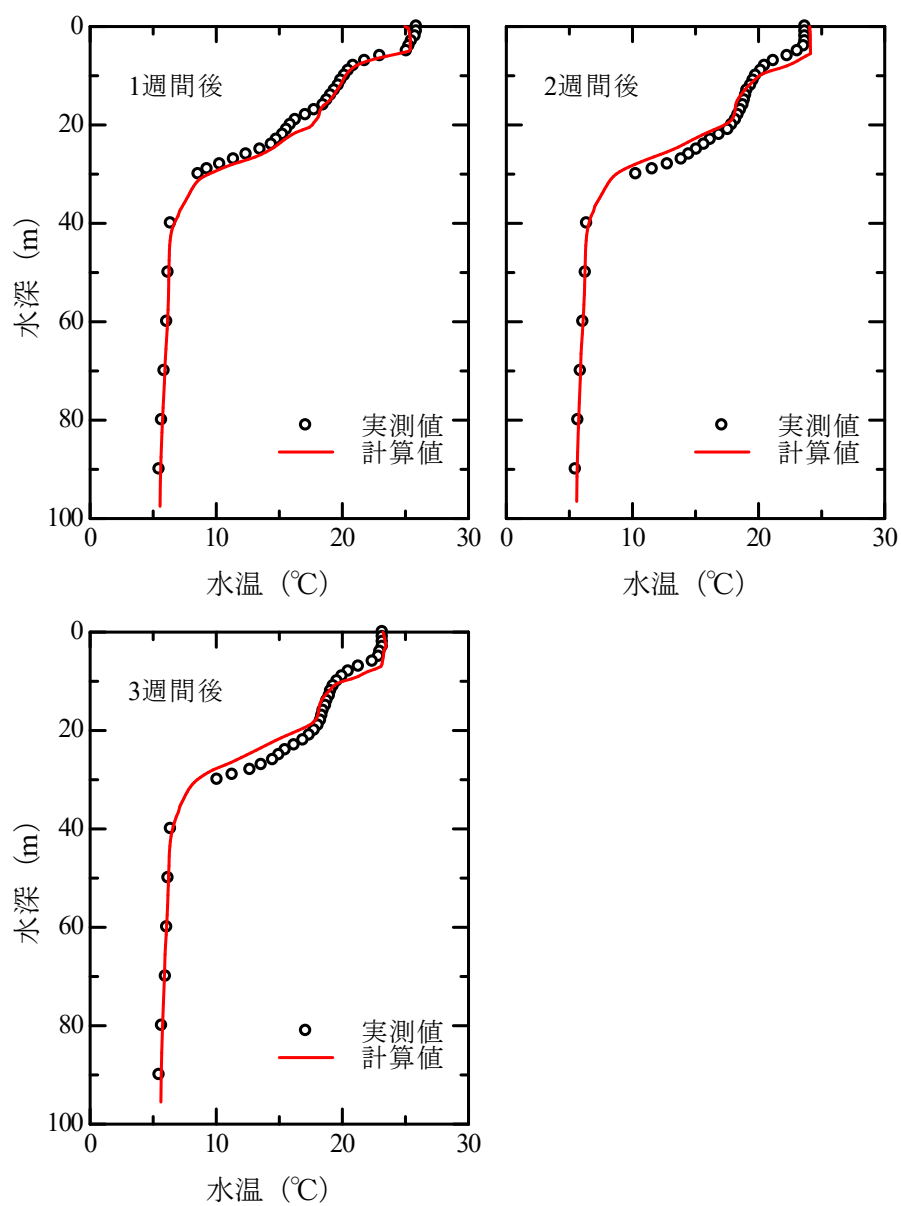


図 2-4-8 水温の精度検証

第3章 SS 沈降速度の減衰率の検討

3-1 現地観測データの整理

3-1-1 水温・濁度データの時系列変化

図 3-1-1 に濁度・水温の縦断観測の結果を示す。St.1 から St.4 までの濁度及び水温データから濁度鉛直分布図と水温コンター図を重ね合わせた。

9 月 10 日の濁度についてみると、St.4 において濁度のピークが 250 FTU まで上昇していることがわかる。濁質の流入については、St.2 及び St.3 において、直前の分画フェンスより深い水深から濁度が上昇しており、St.3 以降は水深 20 m 付近で顕著に濁度が増加し、10~20 m の水深にかけて広がっている。また、水温は 20~30 m において急激に変化する水温躍層が形成されていることが分かった。これらから、濁質は水温躍層の上部でまとまって水平移動していることがわかる。

時系列変化についてみると、洪水後から 1 日後に濁度のピークがあり、7 日後には濁度は大きく低下した。St.3 及び St.4 では、水深 20 m において濁度が最大値となり、21 日後には水深による変化はなくなった。

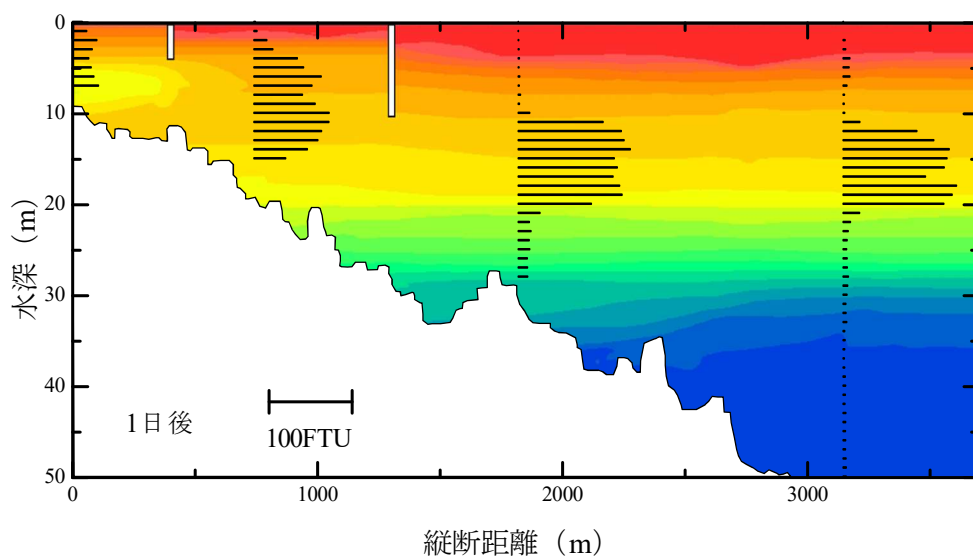


図 3-1-1 (a) 9 月 10 日における濁度・水温縦断分布

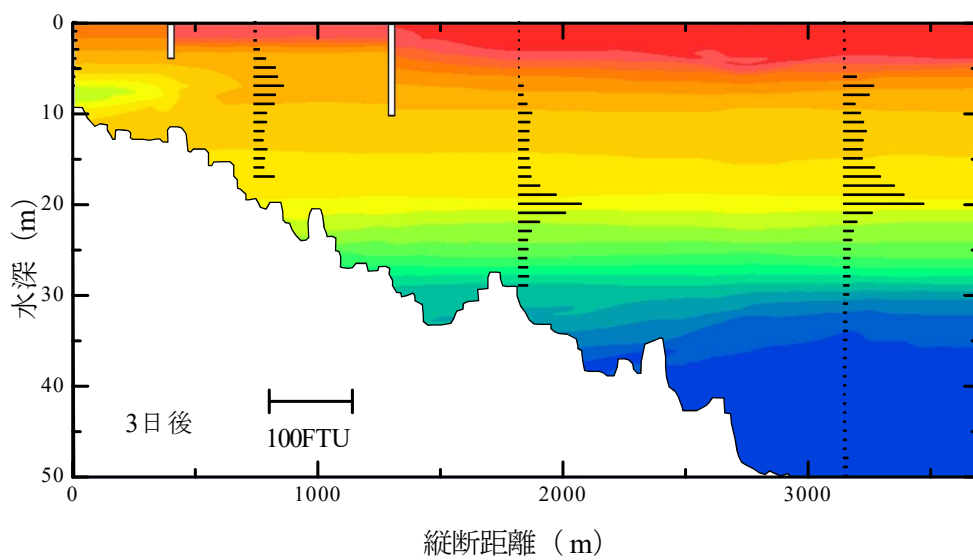


図 3-1-1 (b) 9 月 13 日における濁度・水温縦断分布

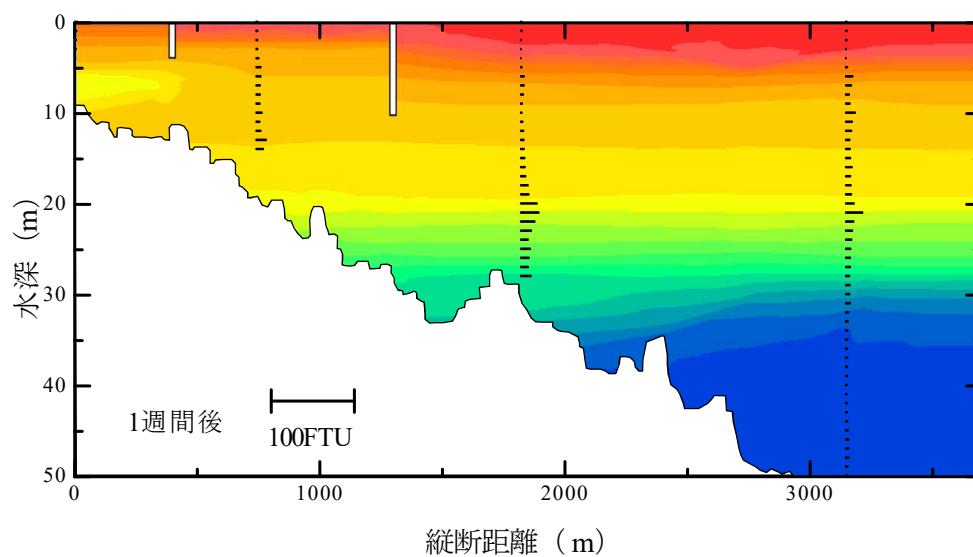


図 3-1-1 (c) 9 月 17 日における濁度・水温縦断分布

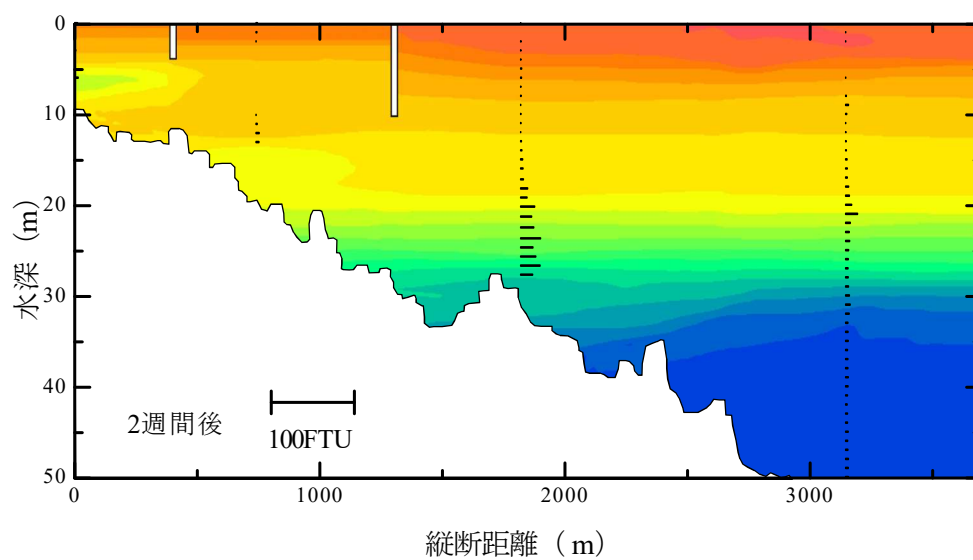


図 3-1-1 (d) 9 月 24 日における濁度・水温縦断分布

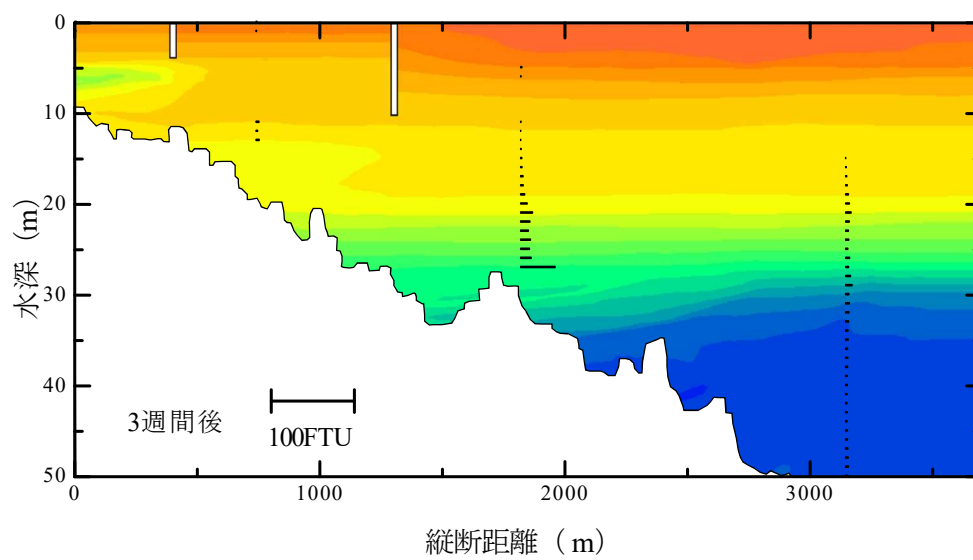


図 3-1-1 (e) 9 月 30 日における濁度・水温縦断分布

3-1-2 洪水濁質の粒度分布

表 3-1-1 にサンプルの採水した日時と深度を示し、図 3-1-2 に粒度分布を示す。直線で累積百分率を示し、マークで含有百分率を示した。

台風 15 号での貯水池内の SS では、 $10\ \mu\text{m}$ 以下の粒子が 80% を占めており、特に $2\sim 10\ \mu\text{m}$ の粒子が全体の 70% を占めていた。洪水発生 1 日後から 1 週間後の SS の粒径ごとの含有量の変化は最大で $7.887\ \mu\text{m}$ の 4% となっており、 $10\ \mu\text{m}$ 以下の粒子では沈降速度に大きな差はないと考えられた。

表 3-1-1 サンプルの取水深度

観測日時	台風からの日数	サンプルの採水深度
9 月 10 日	1 日後	19 m
9 月 13 日	3 日後	19.5 m
9 月 17 日	7 日後	21 m

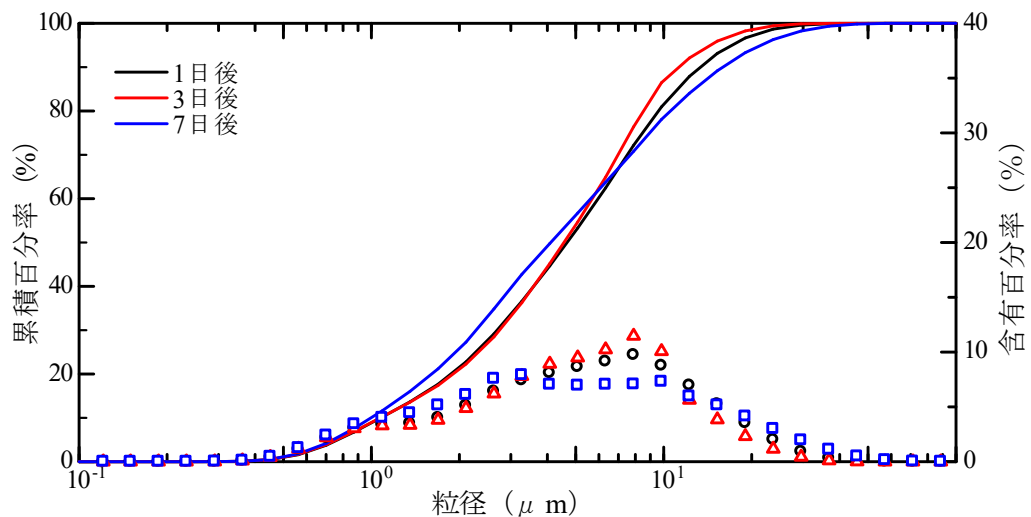


図 3-1-2 水深 20m 付近における粒度分布

3-2 SS 沈降速度の減衰率の作成

3-2-1 ストークス式による沈降速度

三次元流動シミュレーションにおいて SS の流動計算を行うにあたり、粒径を表 3-2-1 のように 11 に分類した。沈降速度は以下のストークス式 (3-2-1) により求めた。

$$w_0 = \frac{1}{18} \cdot \frac{(\rho_s - \rho)gd^2}{\mu} \quad (3-2-1)$$

ρ_s : 土粒子密度 (kg/m³), 2650 kg/m³ とした。

ρ : 水の密度 (kg/m³), 河川水温 17°Cの時の密度を使用。

μ : 粘性係数 (N・s/m²), 河川水温 17°Cの時の係数を使用。

d : 粒径 (m)

g : 重力加速度 (m/s), 9.087 m/s² とした。

表 3-2-1 計算する SS の粒径

粒径 (μm)	沈降速度 (m/s)	沈降速度 (m/day)	流入河川割合 (%)
2.625	5.30×10^{-6}	0.4582	24.72667
3.271	8.24×10^{-6}	0.7115	3.00267
4.076	1.28×10^{-5}	1.1048	3.34167
5.079	1.99×10^{-5}	1.7155	3.62867
6.329	3.08×10^{-5}	2.6638	3.6286
7.887	4.79×10^{-5}	4.1367	4.161
9.828	7.43×10^{-5}	6.4233	4.38
12.247	1.15×10^{-4}	9.9745	4.68767
15.262	1.79×10^{-4}	15.4901	5.04967
19.018	2.78×10^{-4}	24.0525	5.3813
23.699	4.32×10^{-4}	37.3500	37.7227

3-2-2 沈降速度の減衰率の作成

図 3-2-1 より、3 ～10 μm の粒子には大きな沈降速度の差はないと考えられたが、ストークス式により求めた沈降速度では、2.625 μm の粒子が 0.4582 m/day であり、7.887 μm の粒子では 4.1368 m/day と約 10 倍の差が生じた。そこで、現実には即した SS の挙動を再現するために、各粒径の沈降速度に対して図 3-2-2 に示す減衰率を設けることとした。

粒子の沈降速度については、岡村ら（2012）が、単純な粒子構造では数 μm 以下の粒子は 10^{-5} cm/s の沈降速度を持ち、粒径に比例して $D=3$ に近いストークス測に従って沈降速度が増大することを示した。また、フロック構造の場合、粒度分析で得た粒径よりも、実際の沈降速度は低下することがわかっている。

本研究では、標準正規分布の確立密度を 2 倍に引き延ばし、 $-2.2 \sim 2.2$ の範囲を各粒径に当てはめて減衰率を作成した。これは、粒度分布から最も存在量が多かった 7.887 μm を 10^{-5} cm/s の沈降速度を持つように設定し、小さい粒径と大きい粒径の減衰率を過剰に設定しないためである。

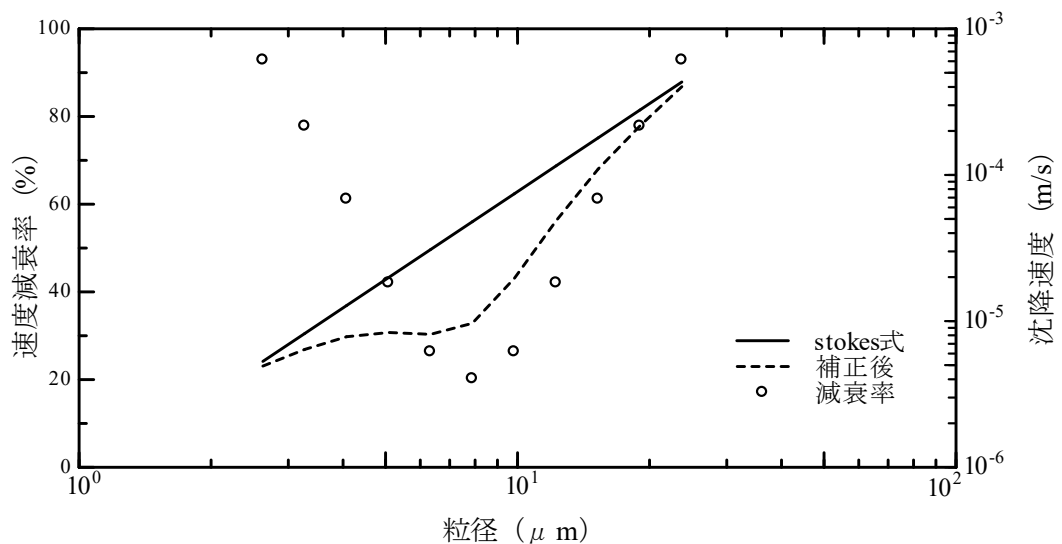


図 3-2-1 各粒径の減衰率と沈降速度

3-3 3次元流体モデルによるSS沈降速度の検証

3-3-1 計算条件と検証ケース

第2章で述べた三次元シミュレーションモデルを用いて、沈降速度の違いによって、SSの再現性についてどのような違いが生ずるかについて検討する。

表3-3-1に、本研究で検討を行った検証ケースについて示す。Case-1は、各粒径の沈降速度をストークス式で求めて、計算した場合である。Case-2は、各粒径に対し、図3-2-1に示している減衰率を用いて計算した場合である。

表3-3-2に、各ケースにおける入力した沈降速度を示し、表3-3-3に計算条件を示した。

表 3-3-1 検証ケース

ケース	沈降速度
Case-1	ストークス式で算出した沈降速度
Case-2	減衰率を用いた沈降速度

表 3-3-2 各ケースの沈降速度

粒径 (μm)	Case-1 の沈降速度 (m/s)	Case-2 の沈降速度 (m/s)
2.625	5.30×10^{-6}	4.93×10^{-6}
3.271	8.23×10^{-6}	6.41×10^{-6}
4.076	1.29×10^{-5}	7.82×10^{-6}
5.079	1.99×10^{-5}	8.35×10^{-6}
6.329	3.08×10^{-5}	8.12×10^{-6}
7.887	4.79×10^{-5}	9.68×10^{-6}
9.828	7.43×10^{-5}	1.96×10^{-5}
12.247	1.15×10^{-4}	4.86×10^{-5}
15.262	1.79×10^{-4}	1.10×10^{-4}
19.018	2.78×10^{-4}	2.17×10^{-4}
23.699	4.32×10^{-4}	4.02×10^{-4}

表 3-3-3 計算条件

基礎方程式	3次元 Navier-Stokes 式
計算格子	非構造デカルト格子
離散化	Ultimate-Quickest 法
乱流モデル	GLS 乱流クロージャー
水平グリッドサイズ	50 m×50 m (6.25 m×6.25 m)
鉛直グリッドサイズ	0.25 m～5.0 m
タイムステップ	15.0 sec
計算期間	2019 年 9 月 7 日 0:00～9 月 30 日 0:00 (助走 3 日)

3-3-2 SS の再現性比較

図 3-3-1 に、濁度の観測値から算出した SS 濃度と、計算で求めた SS 濃度の鉛直分布を示す。観測値と各ケースの計算結果を比較すると、1 日後に SS が水深 10~20 m にかけて広がっていることが再現できていることがわかる。しかし、Case-1 では 25~30 m で、Case-2 では 33 m と 48 m 付近で、観測値より大きな SS 濃度となった。3 日後、7 日後では、SS の濃度が上昇する水深は Case-1、Case-2 とともに同じであり、概ね観測値を再現することができたと言える。

図 3-3-2 に、粒径ごとの SS 濃度の計算値の鉛直分布の比較を示す。Case-1 では、1 日後に、7.828~12.247 μm の粒子が 30 m 付近まで沈降し、3 日後には水深 20 m より深層に沈降している。これは観測値と一致せず、ストークス式の沈降速度では、沈降が卓越した。一方、Case-2 では、3 日後に 10 μm 以下の粒子を水深 20m 付近で確認することができるが、10 μm 以上の粒子は沈降が卓越した。7 日後の比較でも 10 μm までの粒子は概ね水深 20 m までの沈降で表現することができた。

以上より、ストークス式の沈降速度をそのまま用いると、早期に沈降して実測濁度分布を再現できなかった。一方、沈降速度に減衰率を設けた Case-2 では、10 μm 以下の粒子に対して概ね SS の傾向を表現できたと言える。沈降速度を減衰しなければならない理由については、第 4 章で考察を行う。

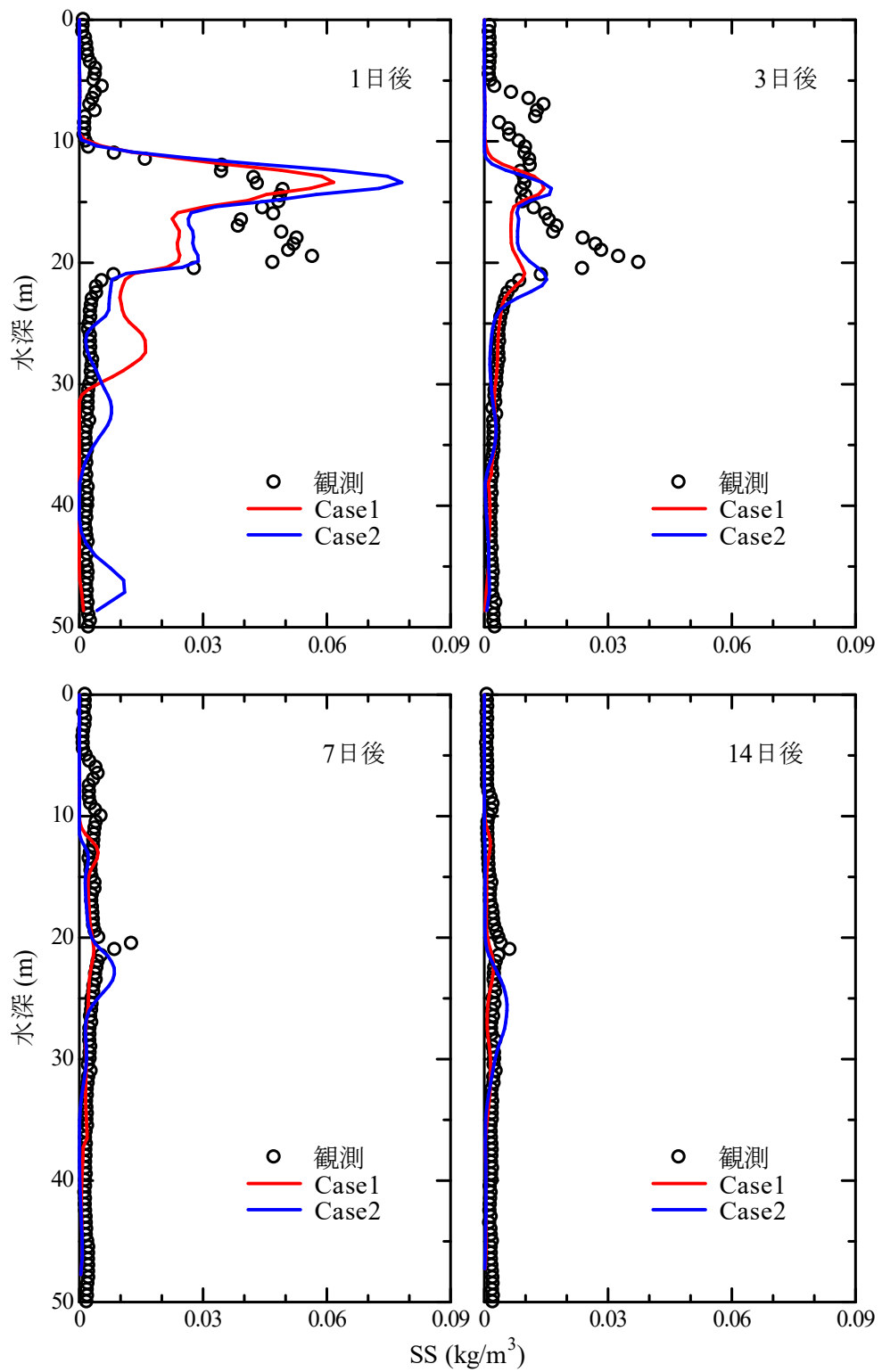


図 3-3-1 SS（全粒径）の観測値と計算値の比較

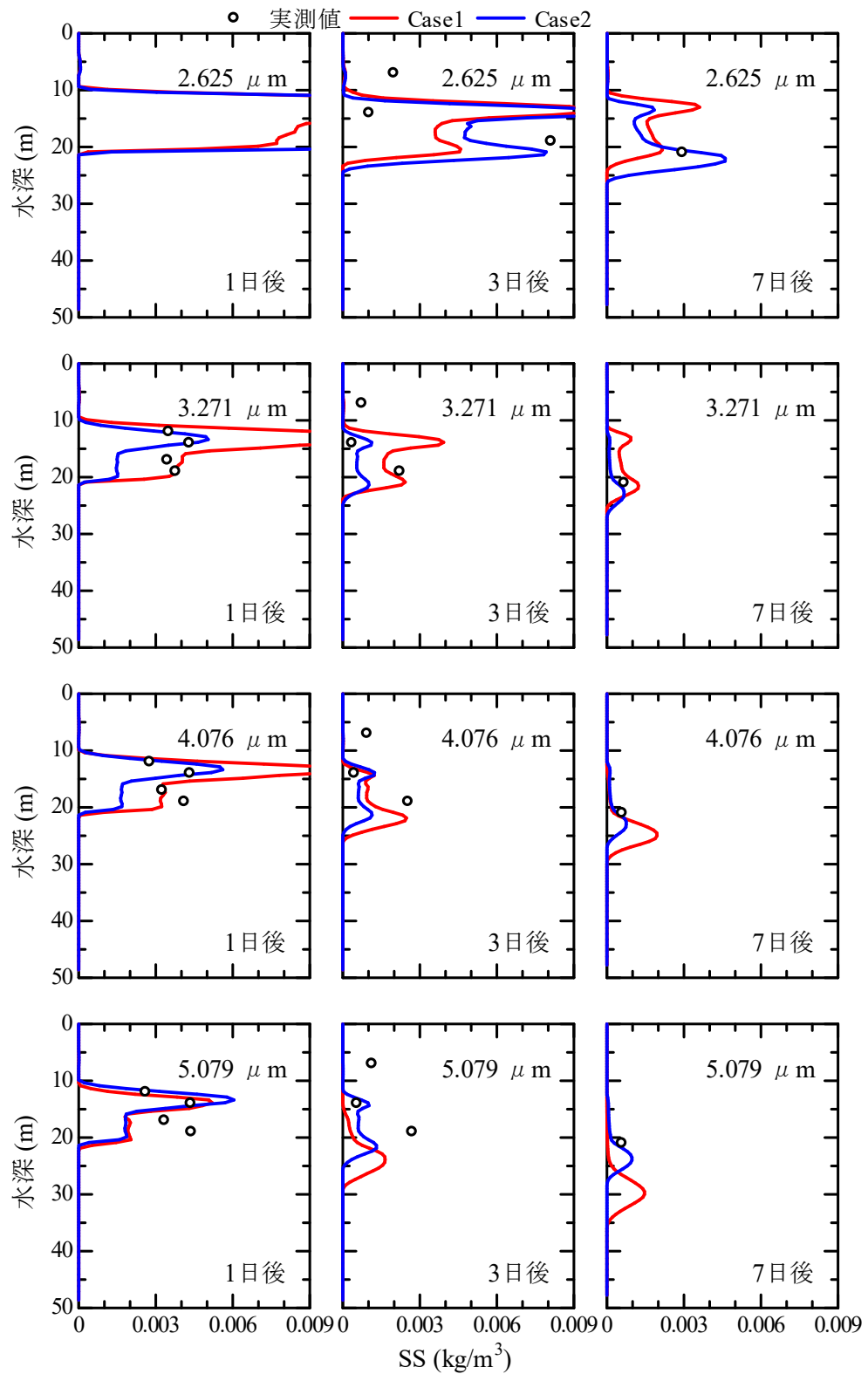


図 3-3-2 (a) 2.625 ~ 5.079 μm の粒子の計算値の比較

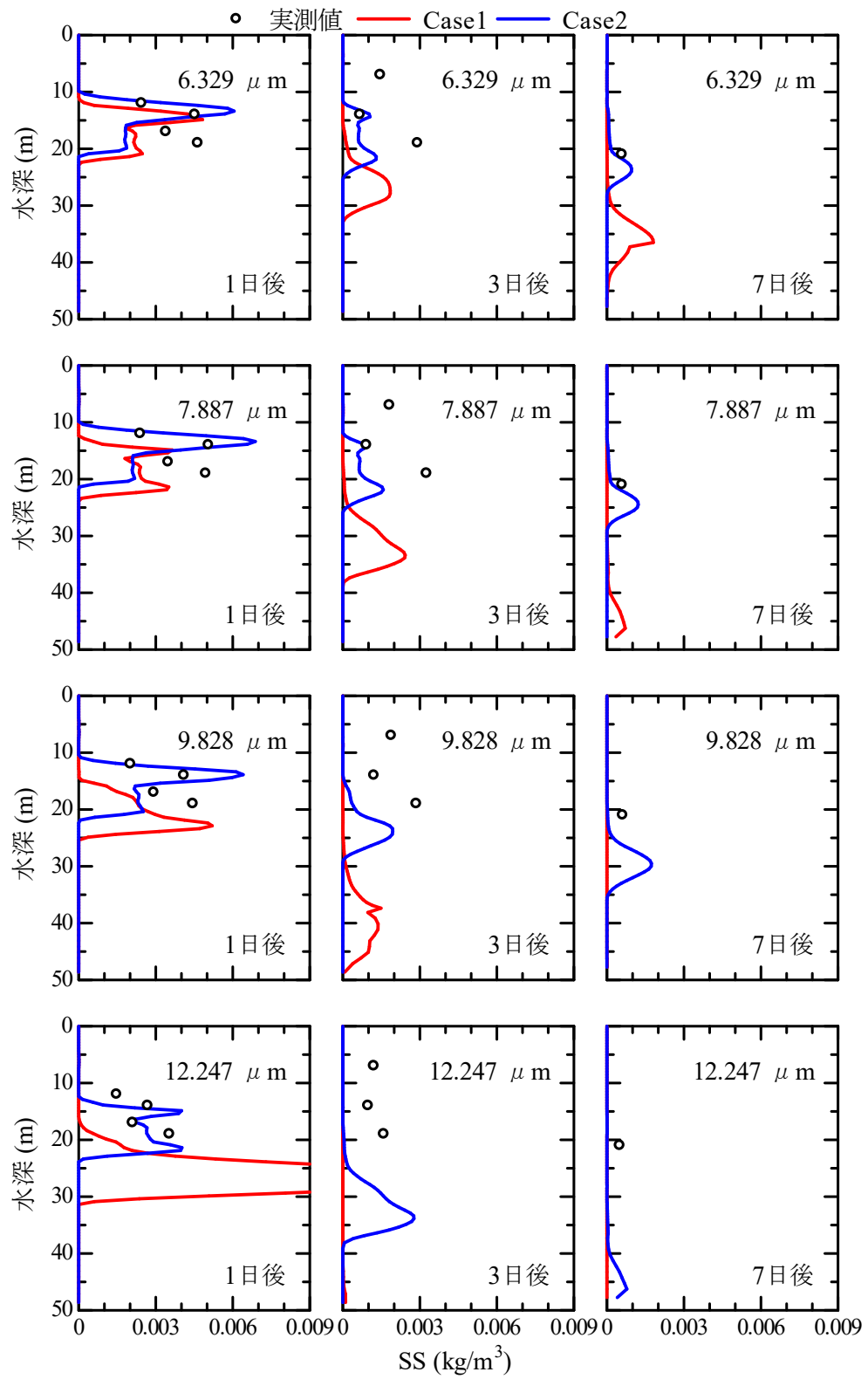


図 3-3-2 (b) 6.329 ~ 12.247 μm の粒子の計算値の比較

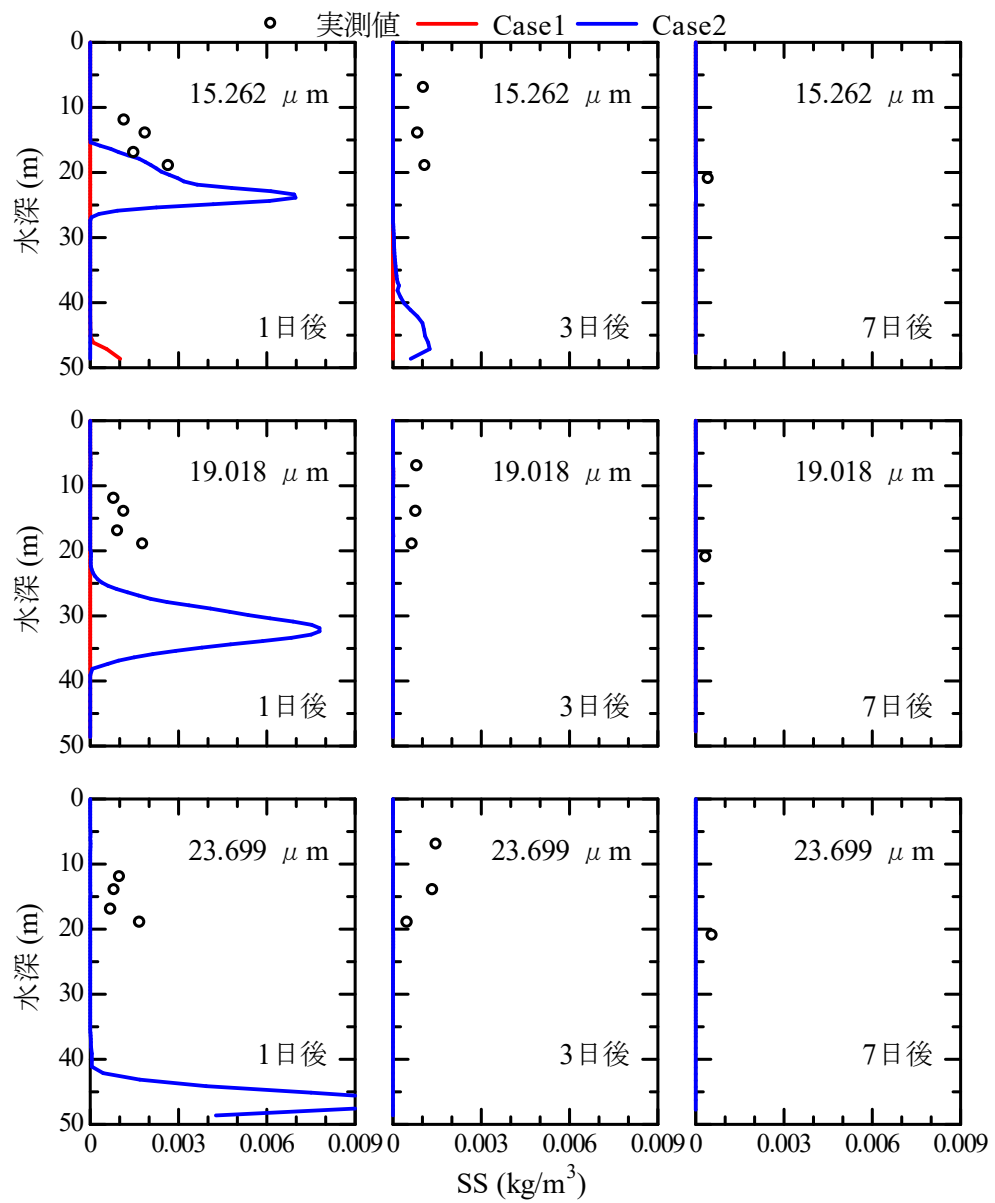


図 3-3-2 (c) 15.262 ~ 23.699 μm の粒子の計算値の比較

第4章 施設運用の違いが

SS 排出に及ぼす影響の検討

4-1 計算条件と検証ケース

第2章で述べた三次元シミュレーション及び、第3章で作成した沈降速度の減衰率を用いて、施設運用の違いがSSの排出率にどのような違いが生じるかについて検討を行う。

表4-1-1に、本研究で行った検証ケースを示し、表4-1-2に計算条件を示した。図4-1-1に放流の境界条件の位置と、分画フェンスの位置を示す。

Case-Aは放流が水深10mで行われるように境界条件を設定した場合であり、Case-Bは20m、Case-Cは30m、Case-Dは40mに設定した。これは、小河内貯水池の選択取水設備では、水深0～42mの範囲において取水する深度を選択することができるためである。

また、現在ダム上流部に設置されている2つの分画フェンスを設置しない場合をCase-I、設置した場合をCase-IIとした2ケースを用意した。第一フェンスの長さは水深10mであり、第二フェンスの長さは水深2mとなっている。

表 4-1-1 検証ケース

ケース	取水深度 (m)	分画フェンスの有無
Case-A- I	10 m	無し
Case-A- II		有り
Case-B- I	20 m	無し
Case-B- II		有り
Case-C- I	30 m	無し
Case-C- II		有り
Case-D- I	40 m	無し
Case-D- II		有り

表 4-1-2 計算条件

基礎方程式	3次元 Navier-Stokes 式
計算格子	非構造デカルト格子
離散化	Ultimate-Quickest 法
乱流モデル	GLS 乱流クロージャー
水平グリッドサイズ	50 m×50 m (6.25 m×6.25 m)
鉛直グリッドサイズ	0.25 m～5.0 m
タイムステップ	15.0 sec
計算期間	2019 年 9 月 7 日 0:00～9 月 30 日 0:00 (助走 3 日)

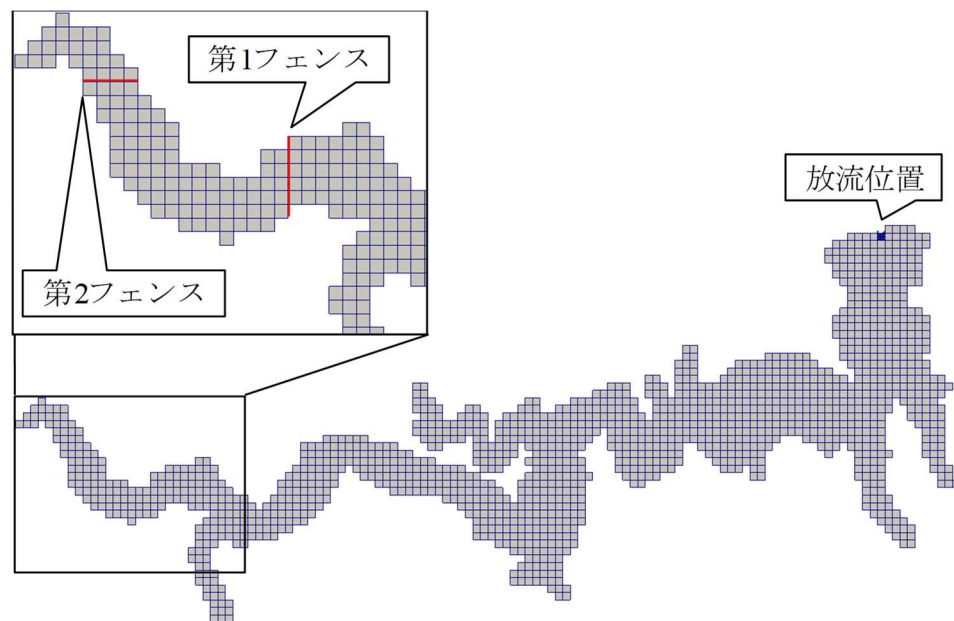


図 4-1-1 放流の境界条件の位置と、分画フェンスの位置

4-2 運用法の違いによる計算結果

4-2-1 排出率の検討

図4-2-1に各ケースのSS排出量の比較を示す。最もSSを排出することができたのはCase-B-II（取水深度20m・フェンス有）であり、SS全体の19%、粒径10 μ m以下の粒子では41%を排出した。取水深度に関しては、20mの排出率が最も高く、以降30, 10, 40mと排出率が低下した。分画フェンスに関しては、分画フェンスが有る場合は、無い場合に比べ、SS全体では最大5%、粒径10 μ m以下の粒子では最大14%多くSSを排出した。

図4-2-2にSS（全粒子）のSS排出率の時間変化を、図4-2-3にSS（10 μ m以下）のSS排出率の時間変化を示す。SS（全粒子）とSS（10 μ m以下）の時間変化を比較すると、傾向が一致しており、排出された粒子のほとんどが10 μ mであることが分かった。Case-B（取水深度20m）の場合、SSの排出が3日後から始まっており、短い時間でSSが取水口まで到達していることが分かった。Case-Cの場合、最終的な排出量は多くなったが、SS排出が開始されるまでの時間は遅かった。これは、粒子が取水口まで沈降する時間が長く、効率的に排出できなかったためだと考えられる。また、分画フェンスが有る場合と無い場合を比較すると、SS排出量が増加する時期は一致しているが、ある場合の方がより多くのSSを排出することができている。これは、分画フェンスによって取水口まで到達するSSが多くなっているためだと考えられる。

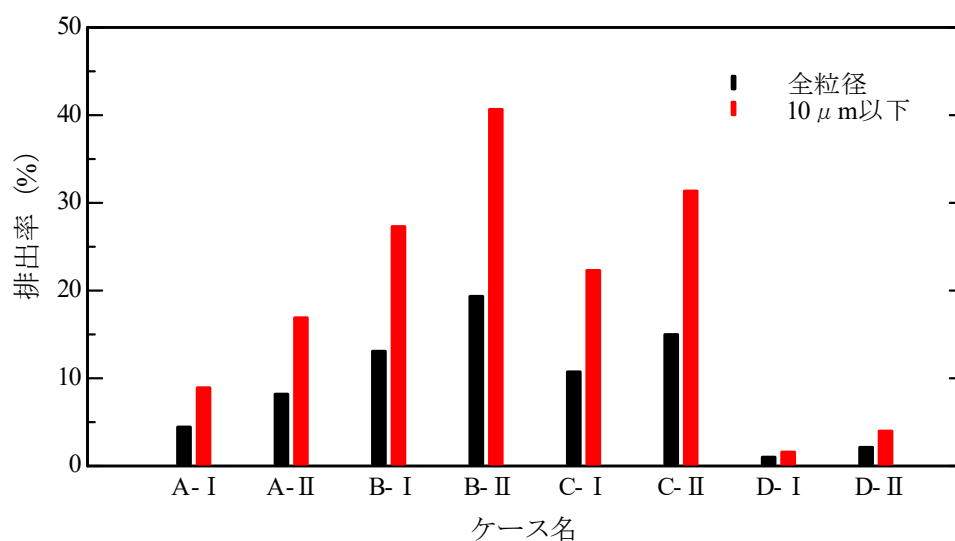


図4-2-1 各ケースの排出率の比較

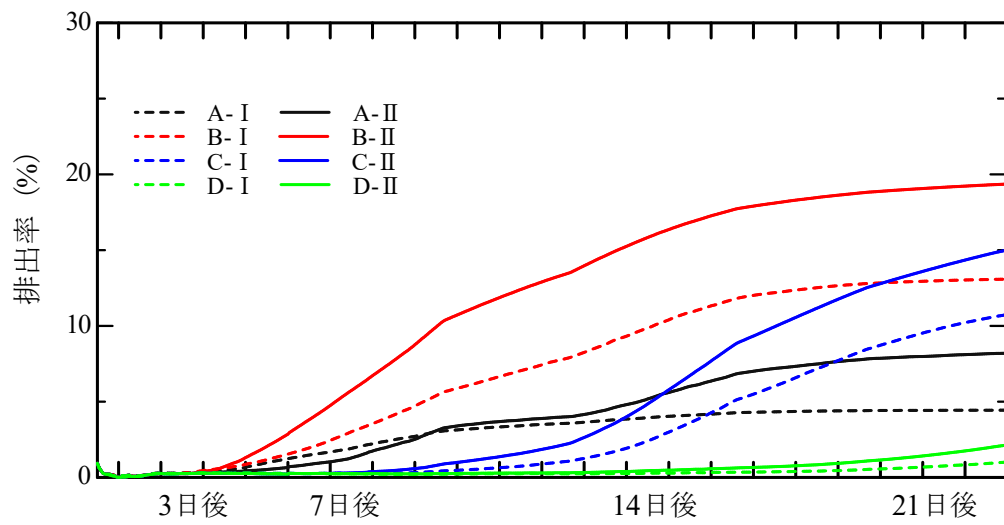


図 4-2-2 SS（全粒子）の SS 排出率の時間変化

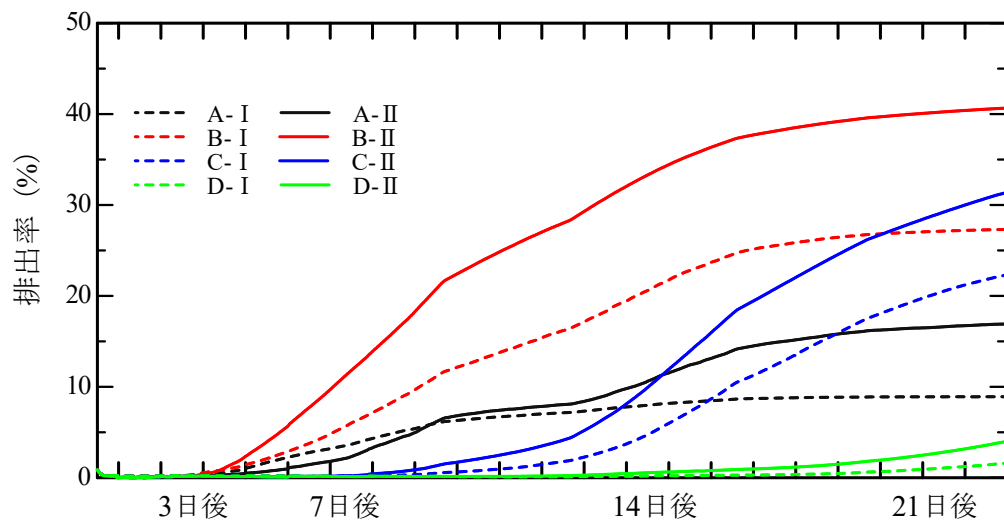


図 4-2-3 SS（10μm）の SS 排出率の時間変化

4-2-2 取水口前に置ける水温・SSの分析

図4-2-4に、洪水から3日ごとの取水口前に置ける水温・SSの鉛直分布を示す。

取水深度が10mの場合、粒子が取水口に到達した時点で、粒子が沈み込み水深10mより深い場所を流れ、排出できていないことがわかる。取水深度が20mの場合、水温二次躍層位置とSSのピーク深度が一致しており、取水口に最も多くのSSが到達している。また、取水口に到達した時点でSSのピーク深度と取水深度が一致していたため、早い段階からSSの排出が始まったため、排出率が高くなったと考えられる。取水深度30mの場合、洪水発生から6日までの取水口に到達した粒子量は少ないが、粒子が沈降し水温二次躍層と一致し始めた9日以降からSS到達量が増加していることがわかる。しかし、SSのピーク深度が取水口と一致するのは12日後であるため、深度20mのケースと比べ排出率が低下した。取水深度40mの場合、SSの到達量が最も低く、また、粒子が取水深度まで沈降するまでの日数が長いために最も排出率が低くなった。以上から、水温二次躍層位置と濁水の流入深度を一致させて水平移動させることが重要であると分かった。

分画フェンスが有る場合と無い場合を比較すると、ある場合はSSの到達量は大きく上昇した。また、水温二次躍層付近の増加が大きいことがわかる。よって、分画フェンスによって、濁水を水温二次躍層付近に誘導させることで、濁水の排出率を増加させることができる。

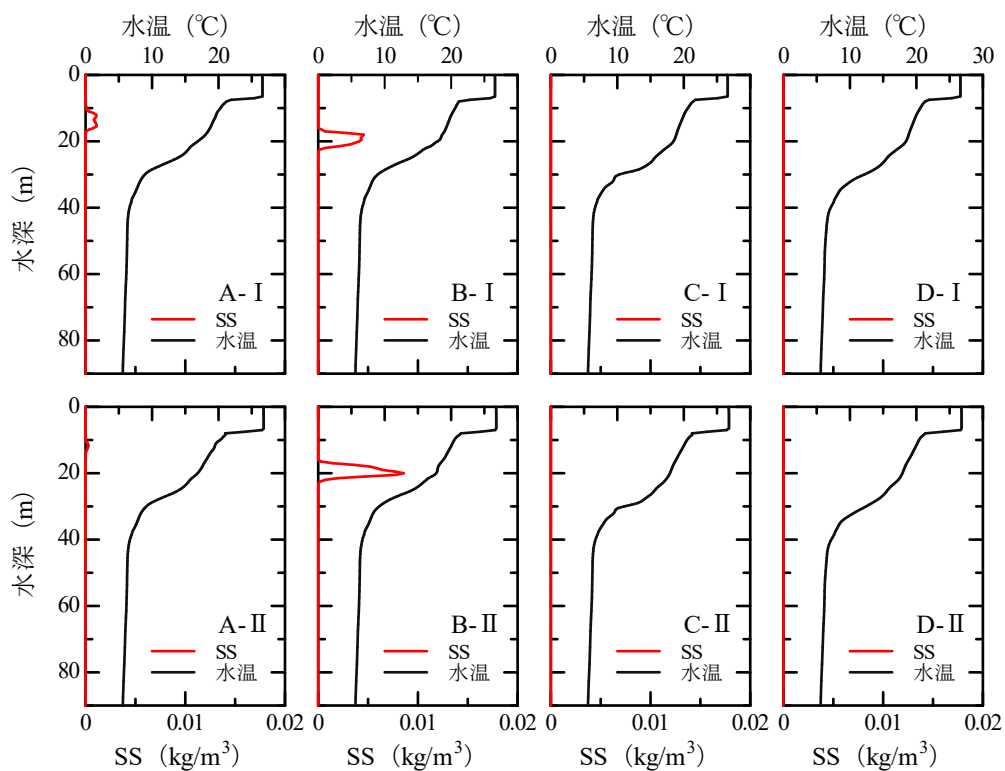


図 4-2-4 (a) 洪水から 3 日後の取水口前での水温・SS 鉛直分析

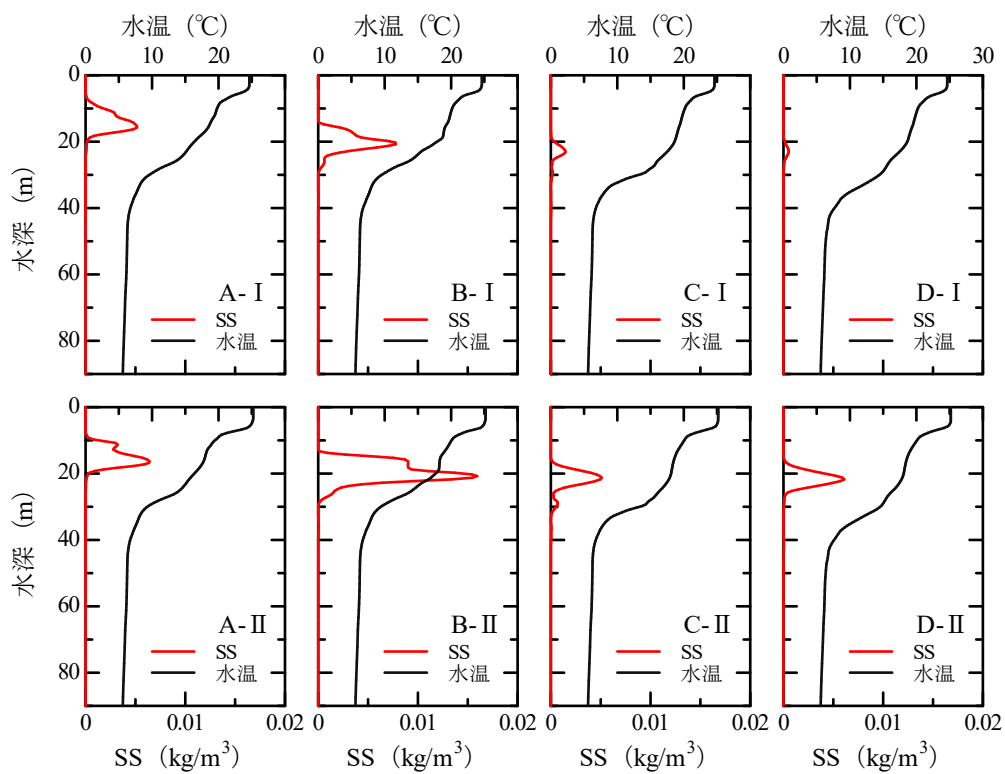


図 4-2-4 (b) 洪水から 6 日後の取水口前での水温・SS 鉛直分析

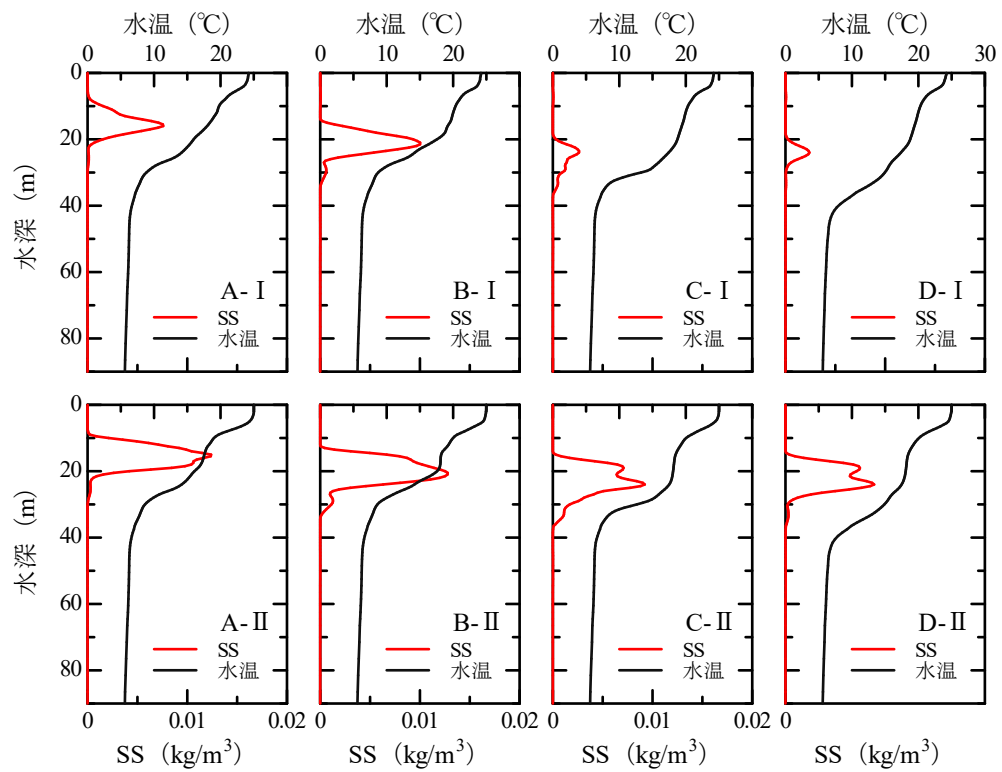


図 4-2-4 (c) 洪水から 9 日後の取水口前での水温・SS 鉛直分析

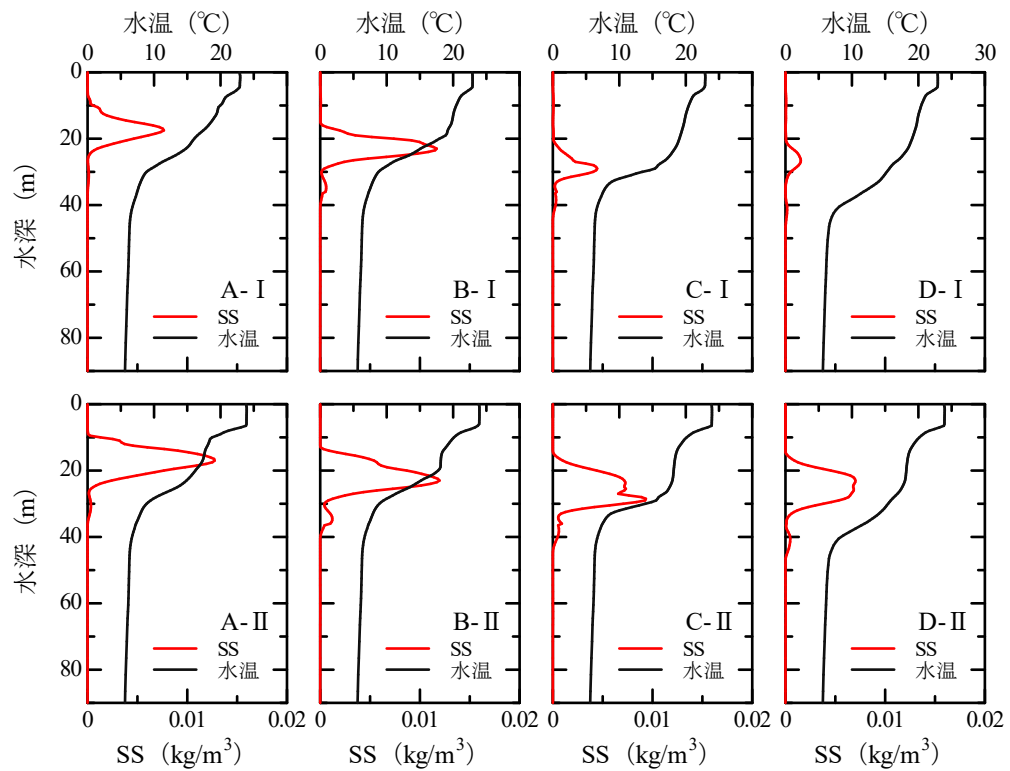


図 4-2-4 (d) 洪水から 12 日後の取水口前での水温・SS 鉛直分析

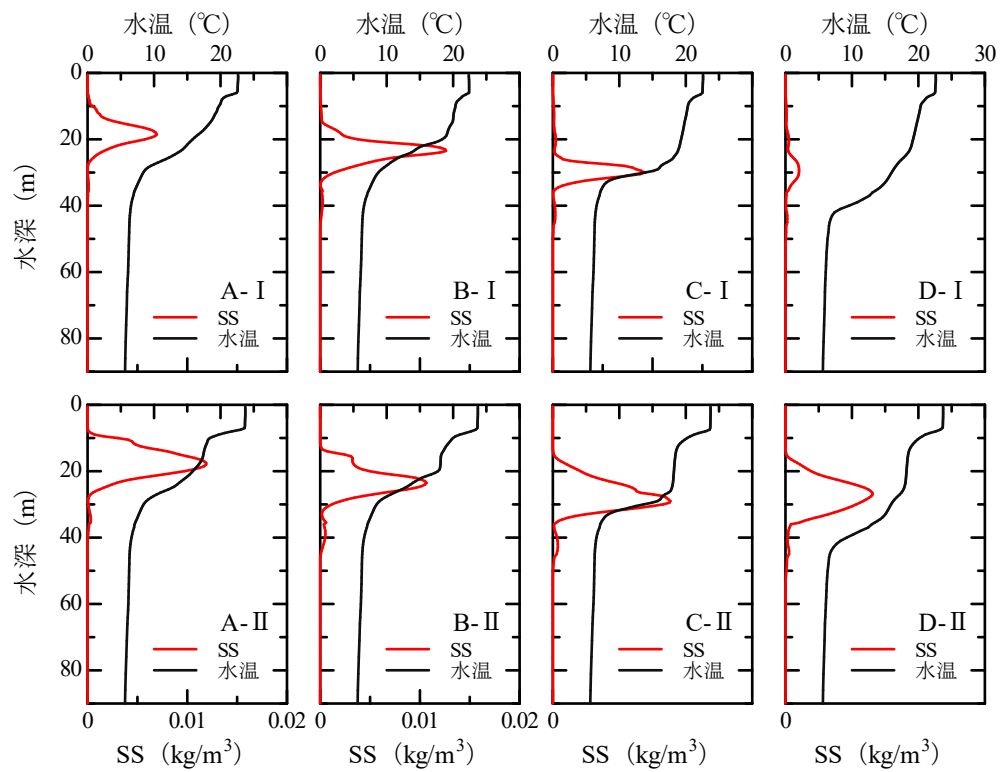


図 4-2-4 (e) 洪水から 15 日後の取水口前での水温・SS 鉛直分析

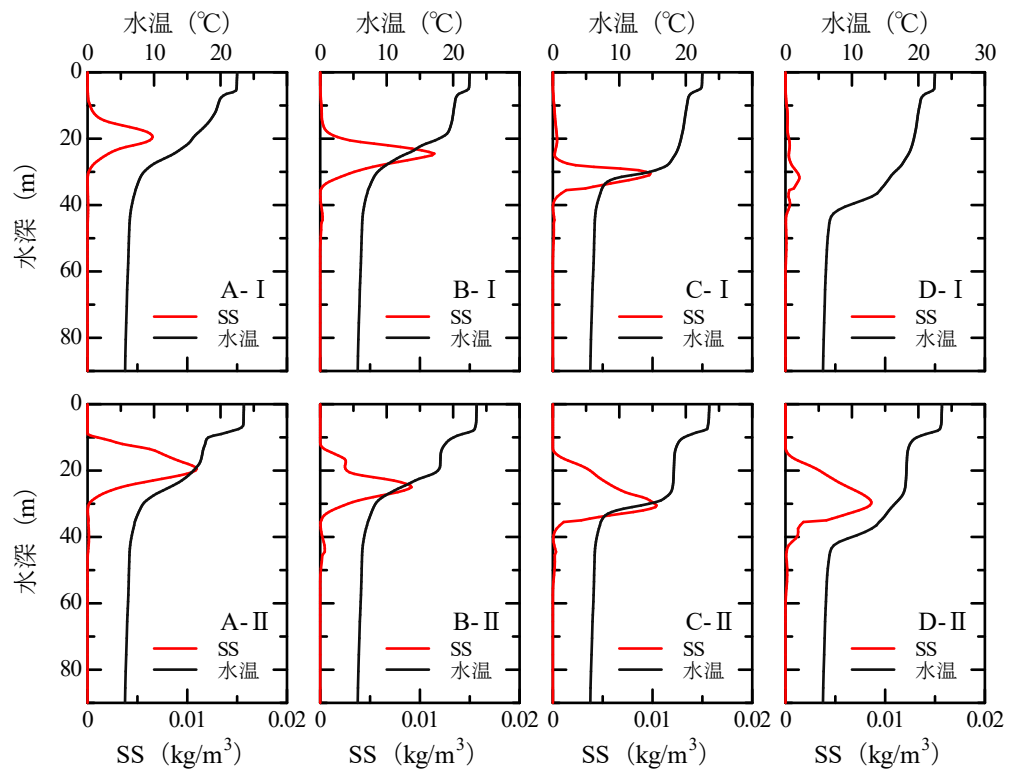


図 4-2-4 (f) 洪水から 18 日後の取水口前での水温・SS 鉛直分析

4-3 乱流に関する考察

第3章では、沈降速度の減衰率を設定することで、実現現象を再現できたので、減衰率の意味について考察を行う。

第3章で検討した減衰率は10 μm の粒子の沈降速度を 10^{-5} cm/s 付近の値になるように設定を行ったが、沈降速度が小さくなる理由として、以下の原因が考えられる。

- ・小さい粒子が合体したフロック構造であるために、粒度分析で得られた粒径から算出される沈降速度よりも小さくなる場合
- ・粒形が小さいために、乱流に取り込まれて沈降しにくくなる場合

そこで、本研究では乱れのエネルギーについてケーススタディーごとの比較を行い、粒子の沈降速度について考察を行った。

4-3-1 乱れのエネルギーの算出方法

流れの乱れの強さ Turbulence Kinetic Energy (tke) は、以下の乱流エネルギー tke と、一般化された乱れの長さスケールに関する量 Ψ の輸送方程式 (4-2-1, 4-2-2) を、連立して解くことによって得られる。

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_M}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B - \epsilon \quad (4-2-1)$$

$$\frac{D\Psi}{Dt} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_M}{\sigma_\Psi} \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) + \frac{\Psi}{k} (c_1 P + c_3 B - c_2 \epsilon) \quad (4-2-2)$$

ここで、 D は実質微分、 z は鉛直上向きの座標、 v_M は鉛直渦動粘性係数、 σ_k と σ_Ψ はそれぞれ k と Ψ の乱流シュミット数、 ϵ は乱流エネルギーの散逸率、そして P と B はそれぞれ、せん断流と浮力による生成項であり、以下の式 (4-2-3, 4-2-4) で表せる。

$$P = v_M M^2, M^2 = \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \quad (4-2-3)$$

$$B = -v_H N^2, N^2 = -\frac{g}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (4-2-4)$$

ここで、 U は水平方向流速、 v_H は鉛直渦拡散計数、 g は重力加速度、 ρ_o は参照密度、 ρ は密度である。

また、 N, M はそれぞれ Prandtl frequency, Burunt-Väisälä frequency と呼ばれる。その他、式に現れる k-OMEGA モデルにおける各係数や、乱流エネルギーの散逸率 ϵ の式については、新谷 (2016) において述べられている。

また、乱れエネルギーの計算で用いる最小値は、フェンスや洪水時の計算を安定させるために必要であり、本研究では、 10×10^{-9} で計算を行った。

4-3-2 乱れエネルギーの比較

図4-3-1に、取水口前での乱れのエネルギー (tke) と水温・SSの鉛直分布、図4-3-2に、SSと tke の縦断コンター図を示す。コンター図から貯水池の流動層付近の値が小さくなっているが、これは、水温躍層の影響により(4-2-4)で示す浮力の減衰項 B の値が大きくなるためである。下層の tke が高くなるのは、底面におけるせん断力 P で生成されるものであり、上下に拡散している。上層に比べて下層の tke が大きい理由は、下層の水温勾配が小さいためだと考えられる。 tke の値が 10^{-9} を下回る部分は、浮力の減衰項 B の影響であるが、次ステップでは計算時に 10^{-9} で統一される。

また、取水深度20mのケースと30mのケースのSSのピーク深度を比較すると、洪水から18日後において、20mの場合25mであるのに対し、30mの場合30m付近となっていることがわかる。これは、取水深度が20mである場合、6日後から12日後について、30mの場合よりも大きい乱れの中にいるために粒子が沈降しづらくなった可能性が考えられる。

取水深度20mの分画フェンスの有無による、18日後のSS分布について着目すると、分画フェンスが有る場合、SSの存在している水深が12mからであるのに対し、無い場合は15mからであった。この2つのケースの水温と乱れエネルギーを比較すると、水温分布については大きな差はなかった。一方、フェンスが有る場合は、乱れエネルギー大きさが高くなった。このことから、乱れの高い層をSS粒子が流れることによって、実際の沈降速度が小さくなる可能性が示唆された。

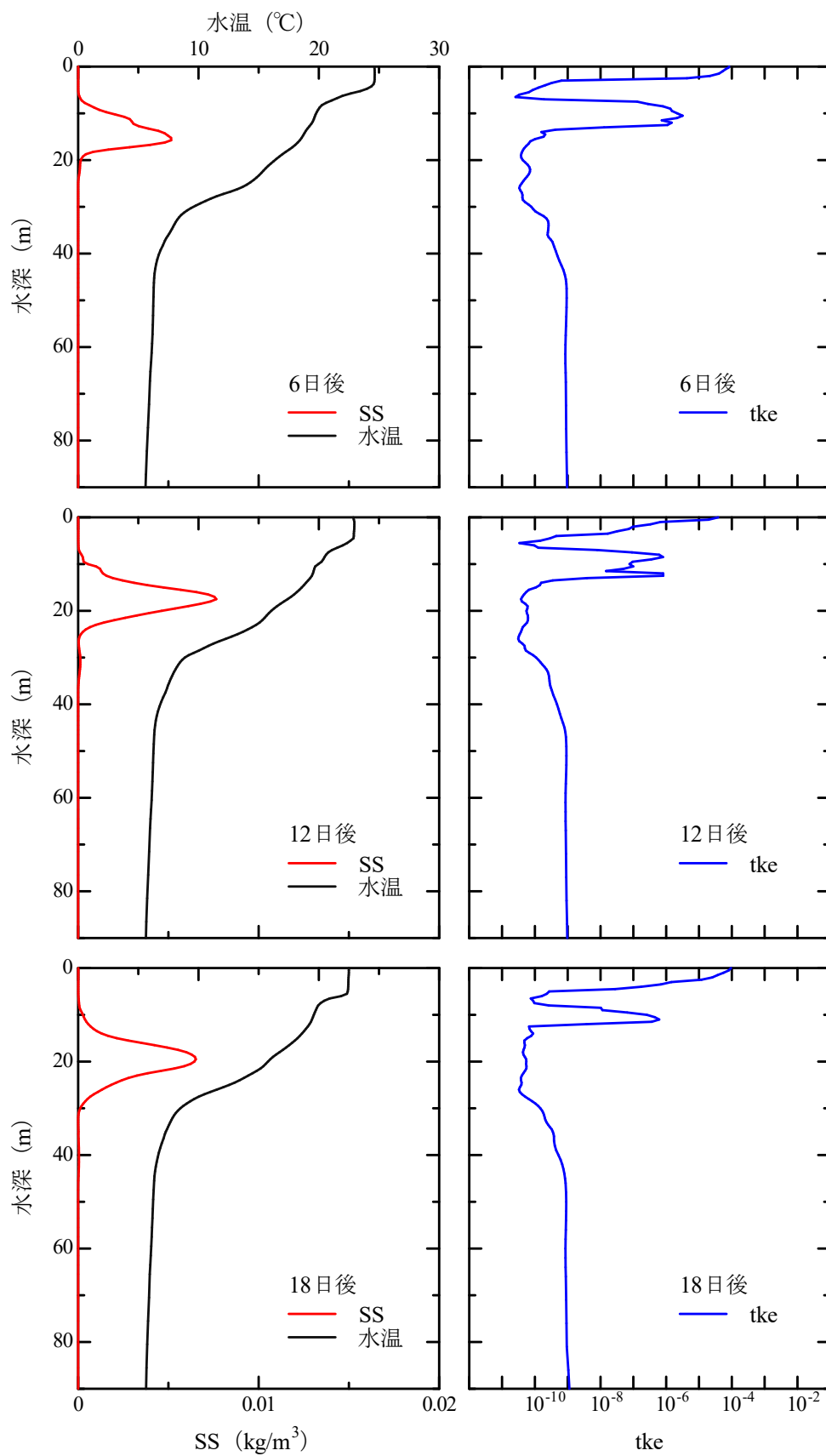


図 4-3-1 (a) Case-A-I の水温・SS・乱れエネルギーの鉛直分布

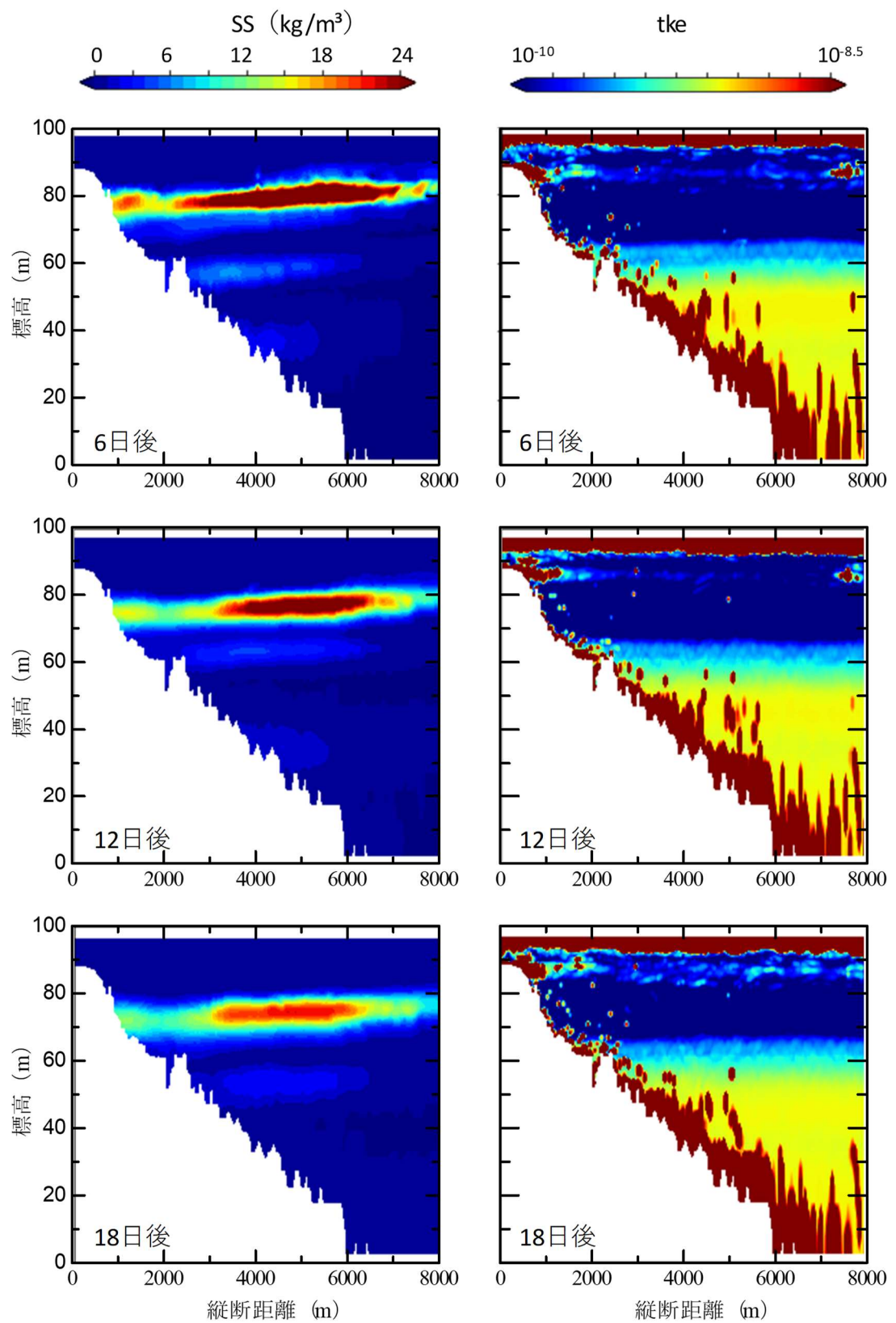


図 4-3-2 (a) Case-A-I の SS, 乱れエネルギーの縦断コンター図

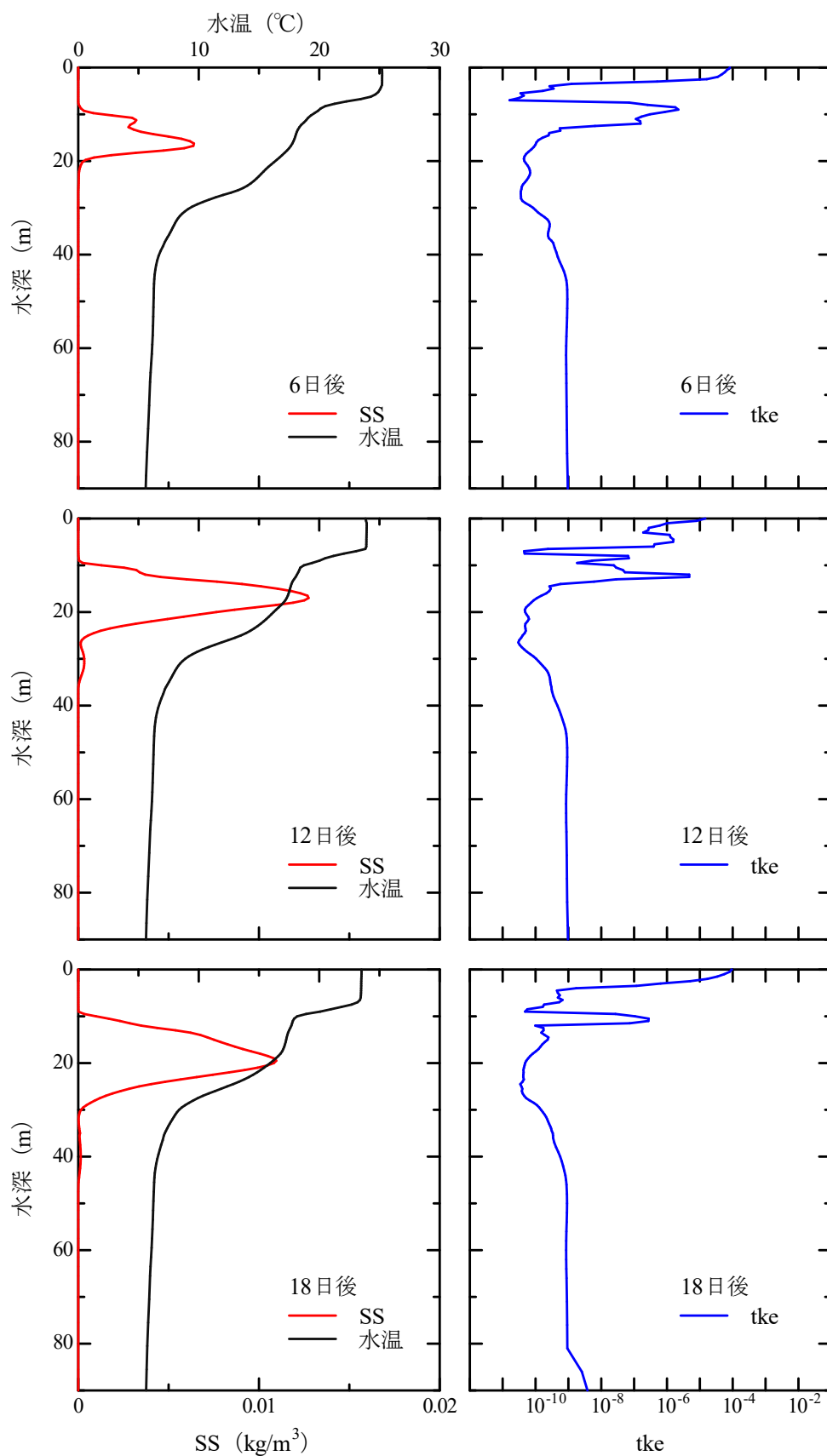


図 4-3-1 (b) Case-A-II の水温・SS・乱れエネルギーの鉛直分布

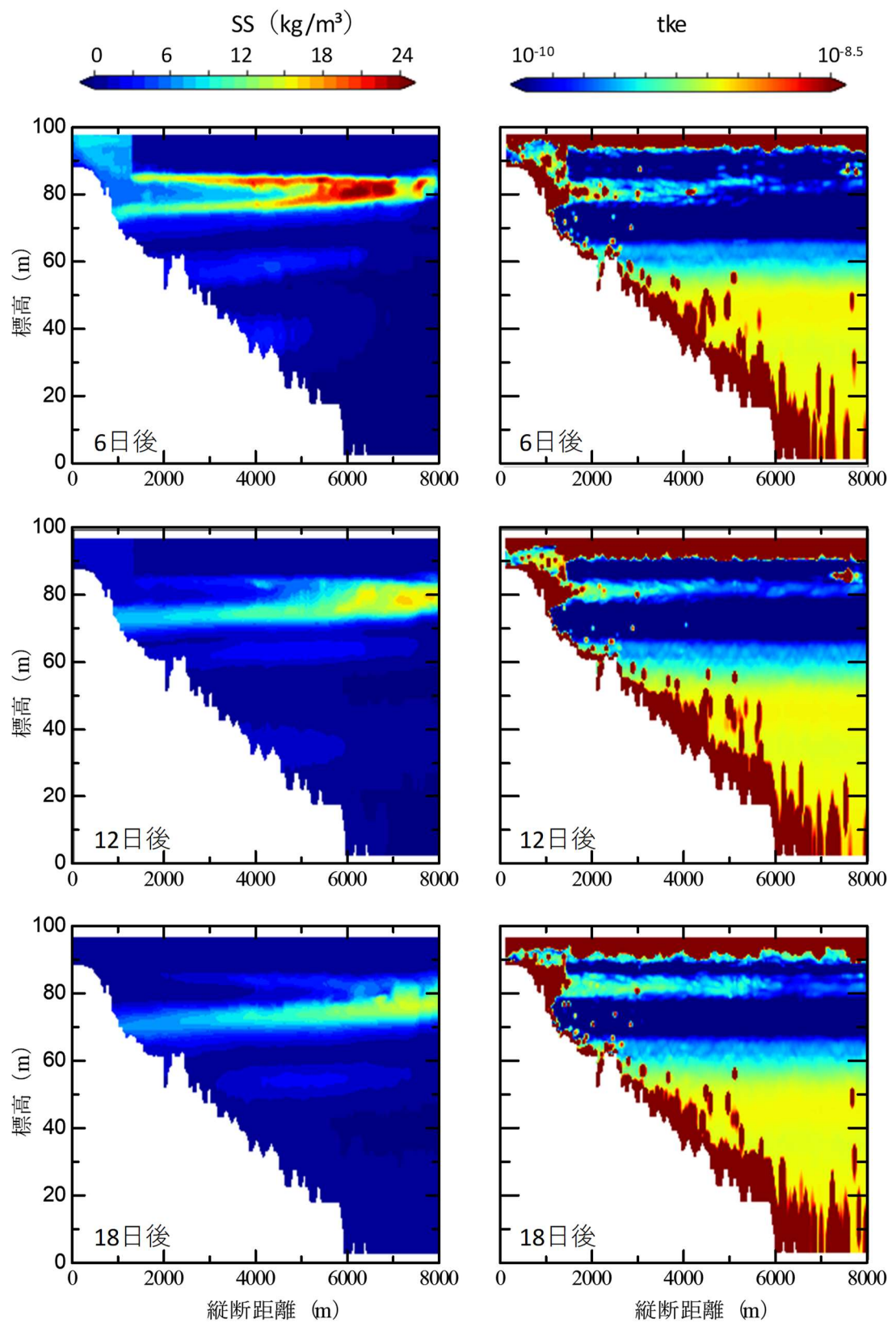


図 4-3-2 (b) Case-A-II の SS, 乱れエネルギーの縦断コンター図

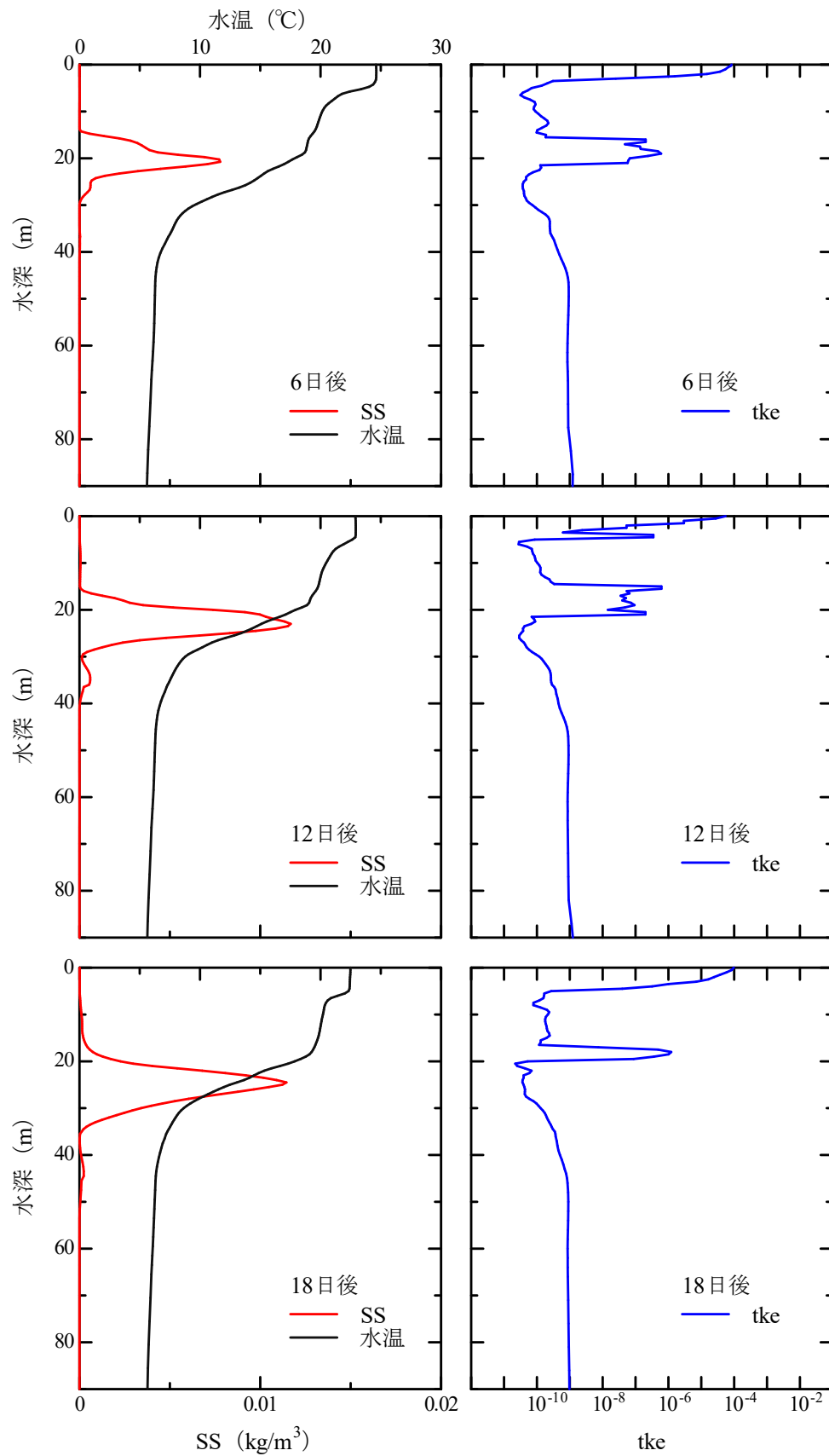


図 4-3-1 (c) Case-B-I の水温・SS・乱れエネルギーの鉛直分布

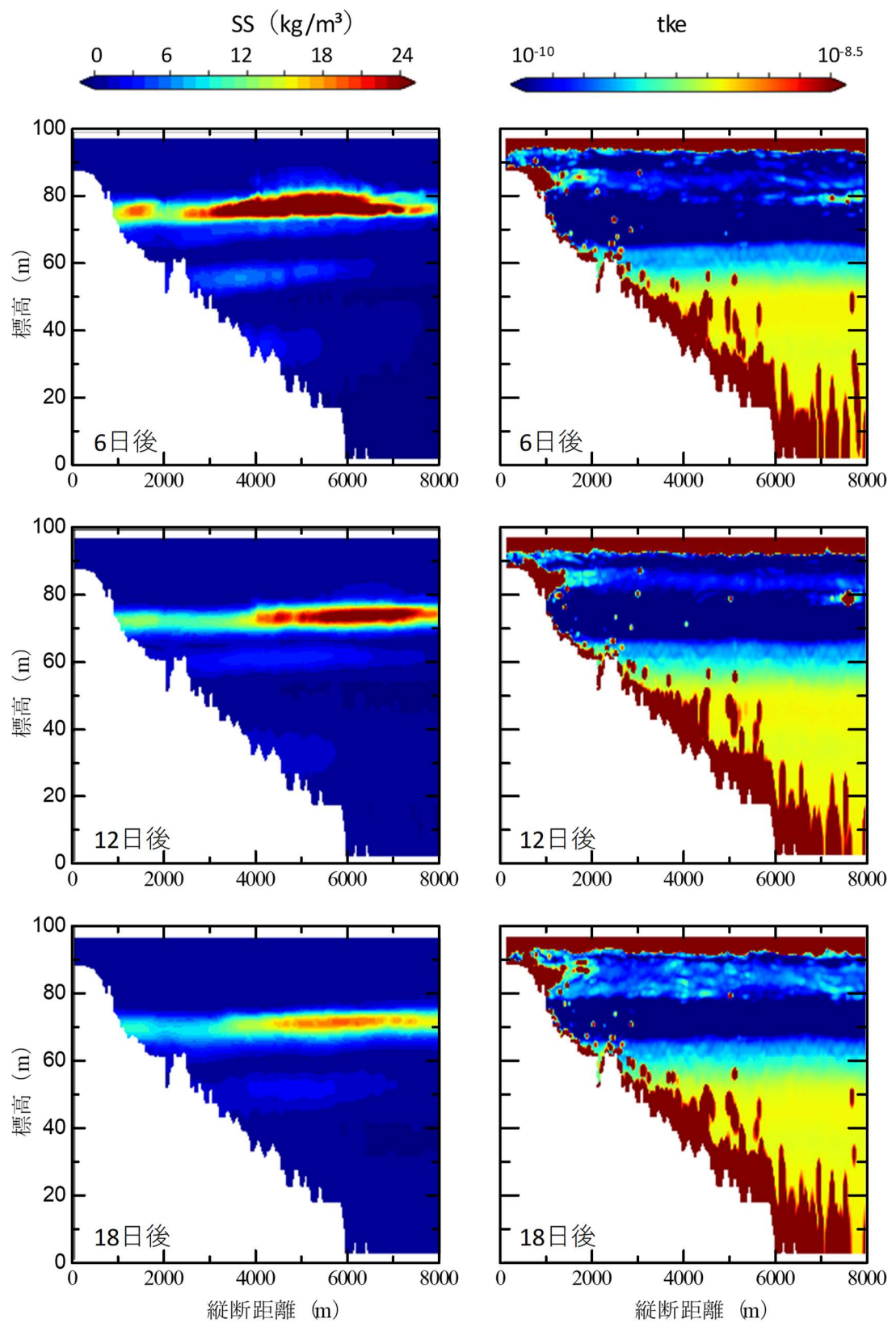


図 4-3-2 (c) Case-B-I の SS, 乱れエネルギーの縦断コンター図

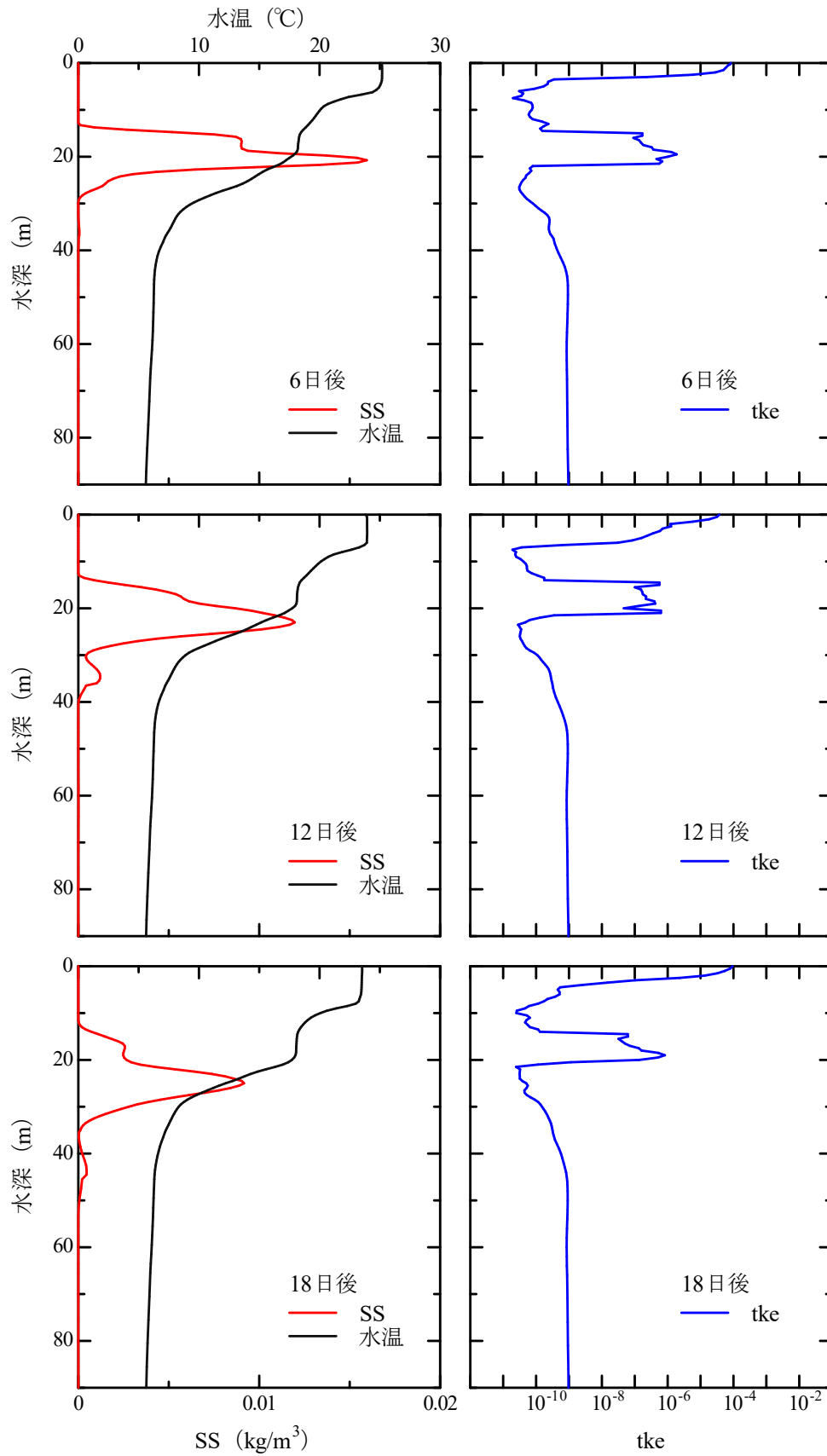


図 4-3-1 (d) Case-B-II の水温・SS・乱れエネルギーの鉛直分布

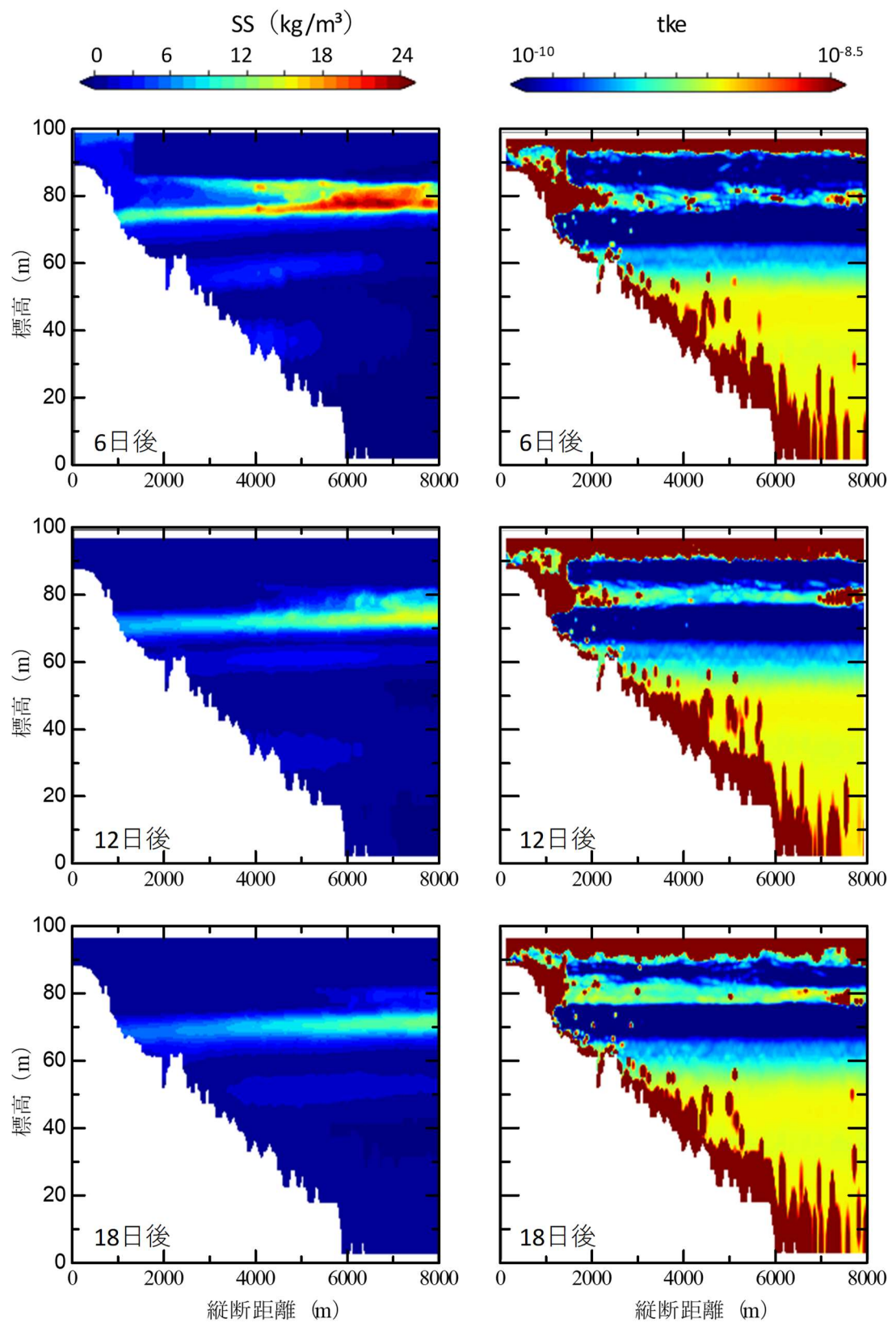


図 4-3-2 (d) Case-B-II の SS, 乱れエネルギーの縦断コンター図

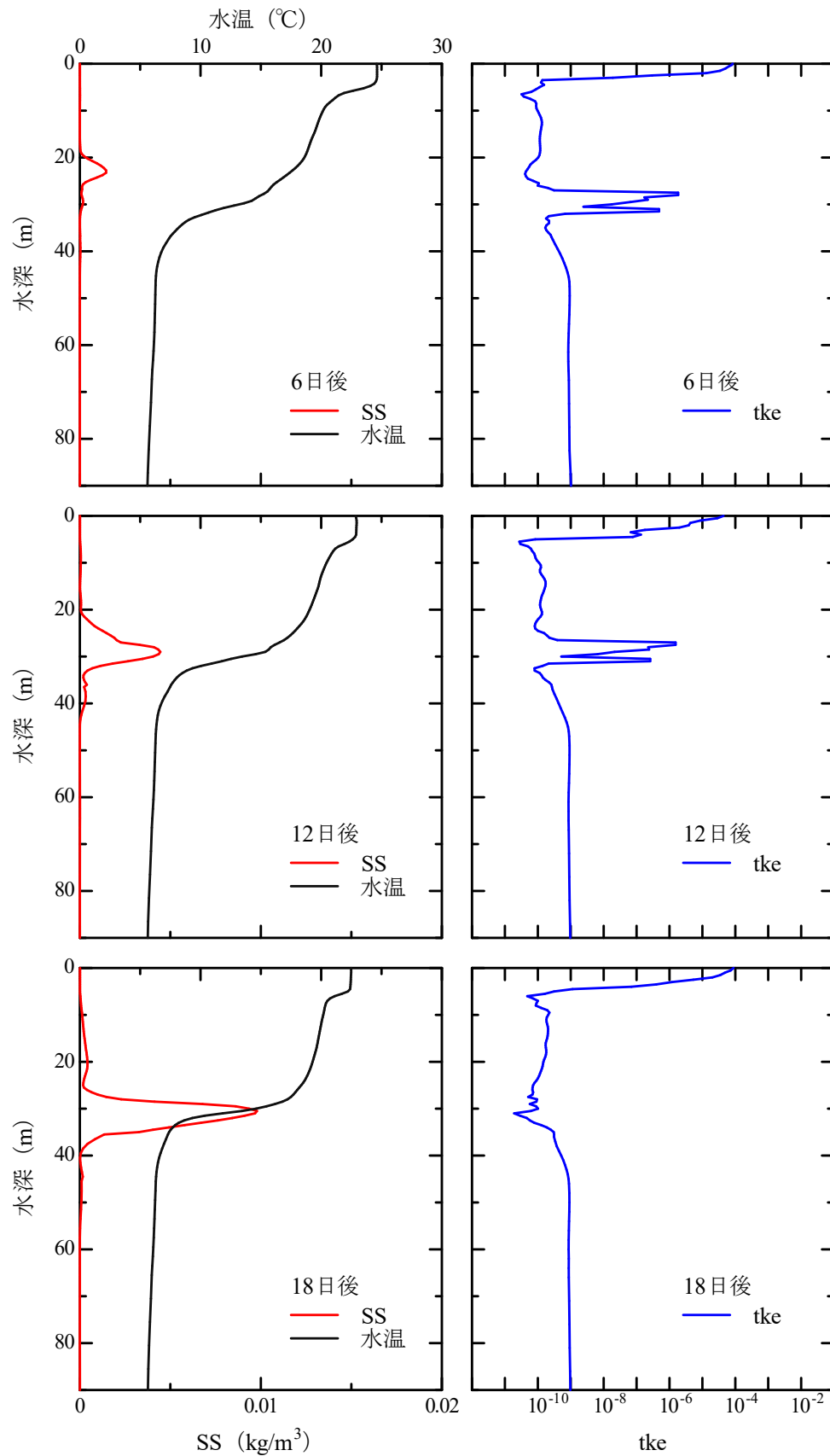


図 4-3-1 (e) Case-C- I の水温・SS・乱れエネルギーの鉛直分布

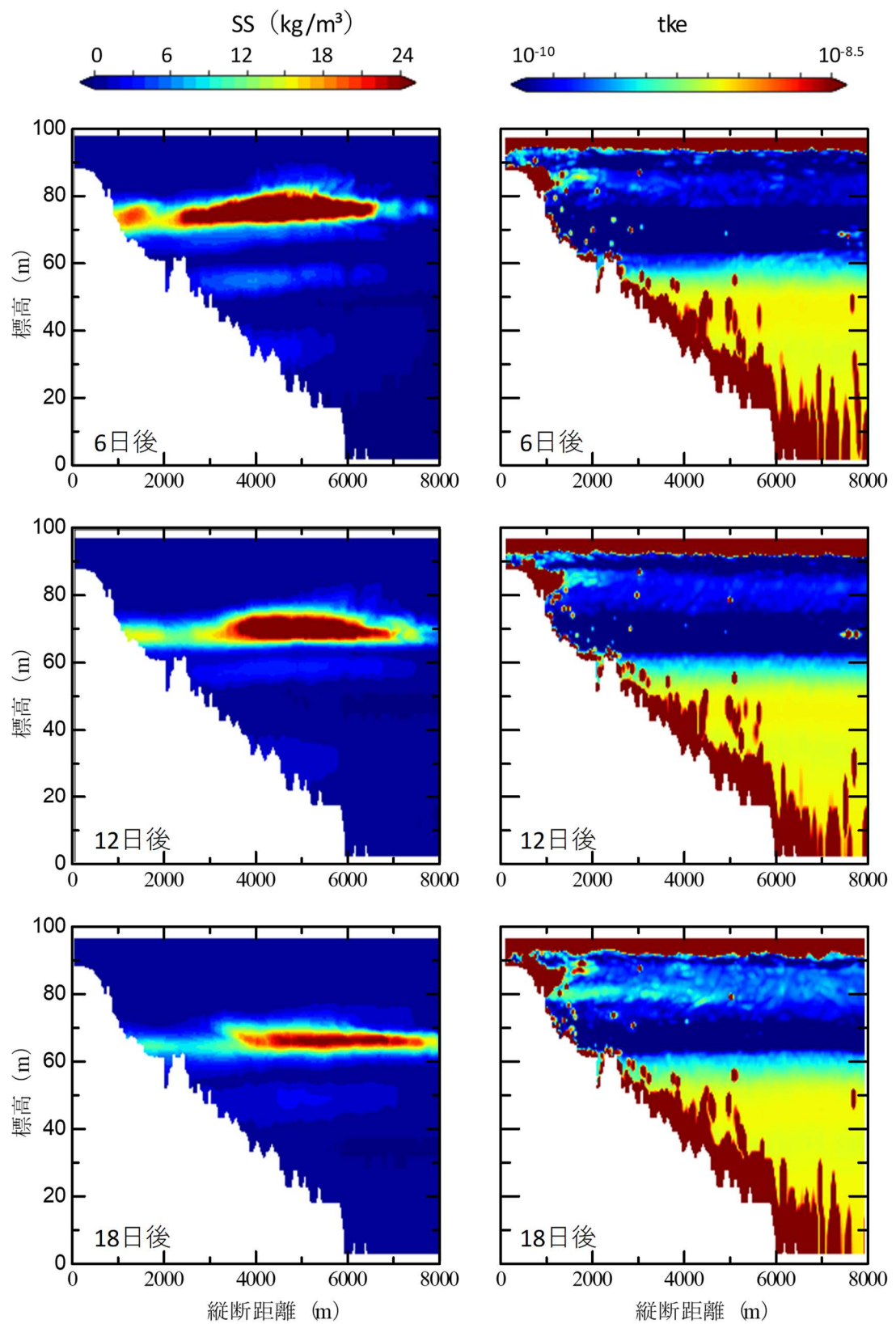


図 4-3-2 (e) Case-C-I の SS, 乱れエネルギーの縦断コンター図

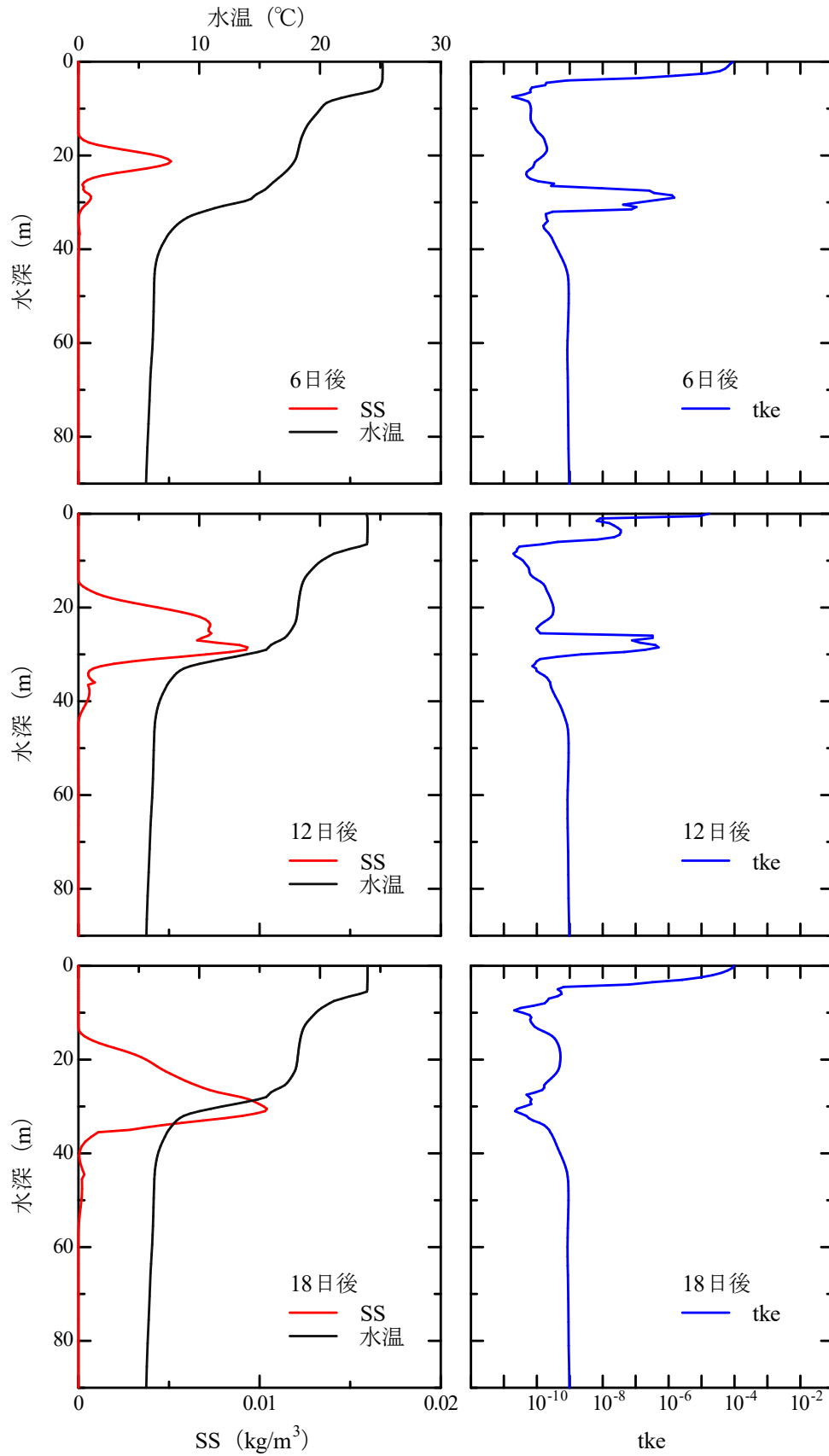


図 4-3-1 (f) Case-C-II の水温・SS・乱れエネルギーの鉛直分布

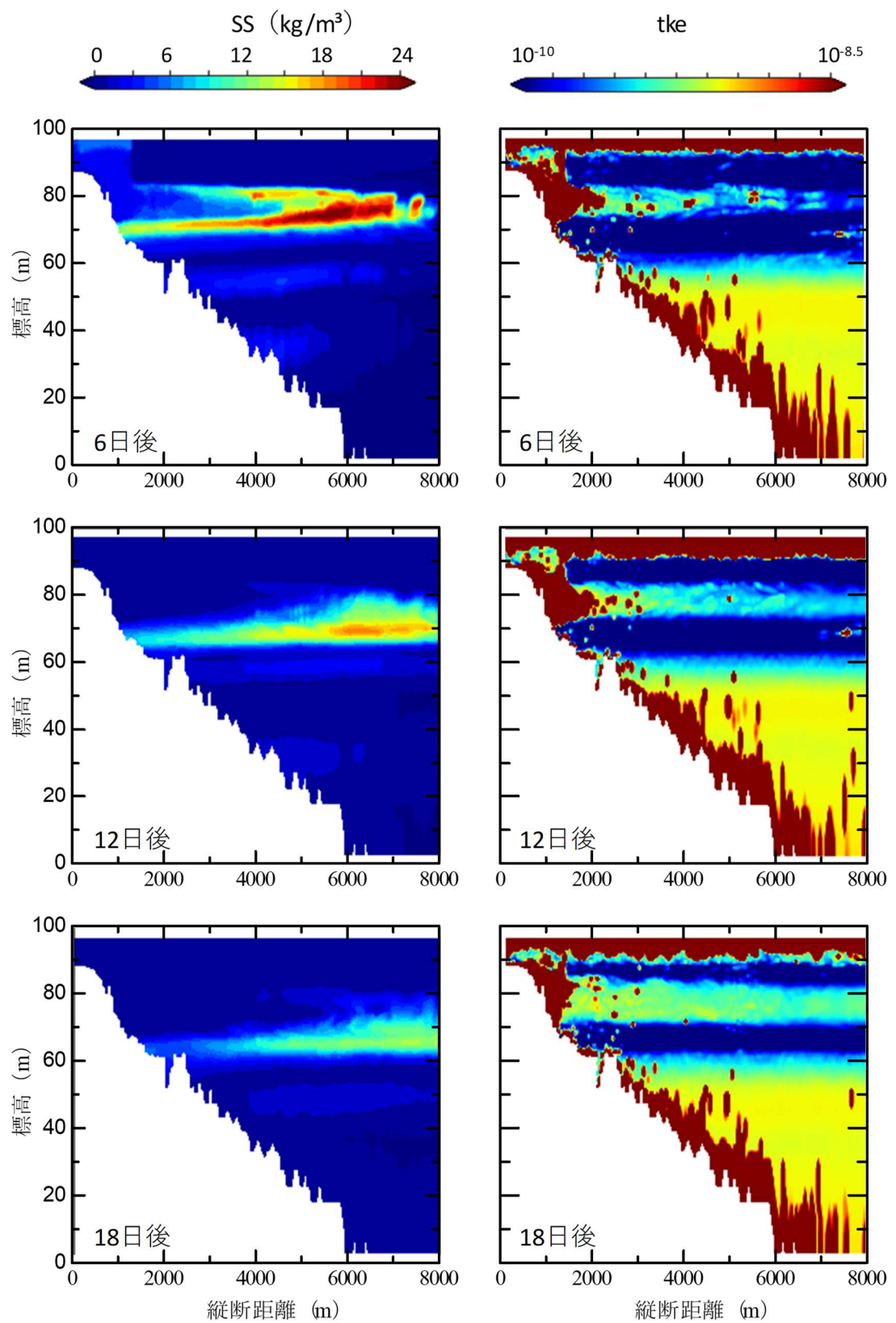


図 4-3-2 (f) Case-C-II の SS, 乱れエネルギーの縦断コンター図

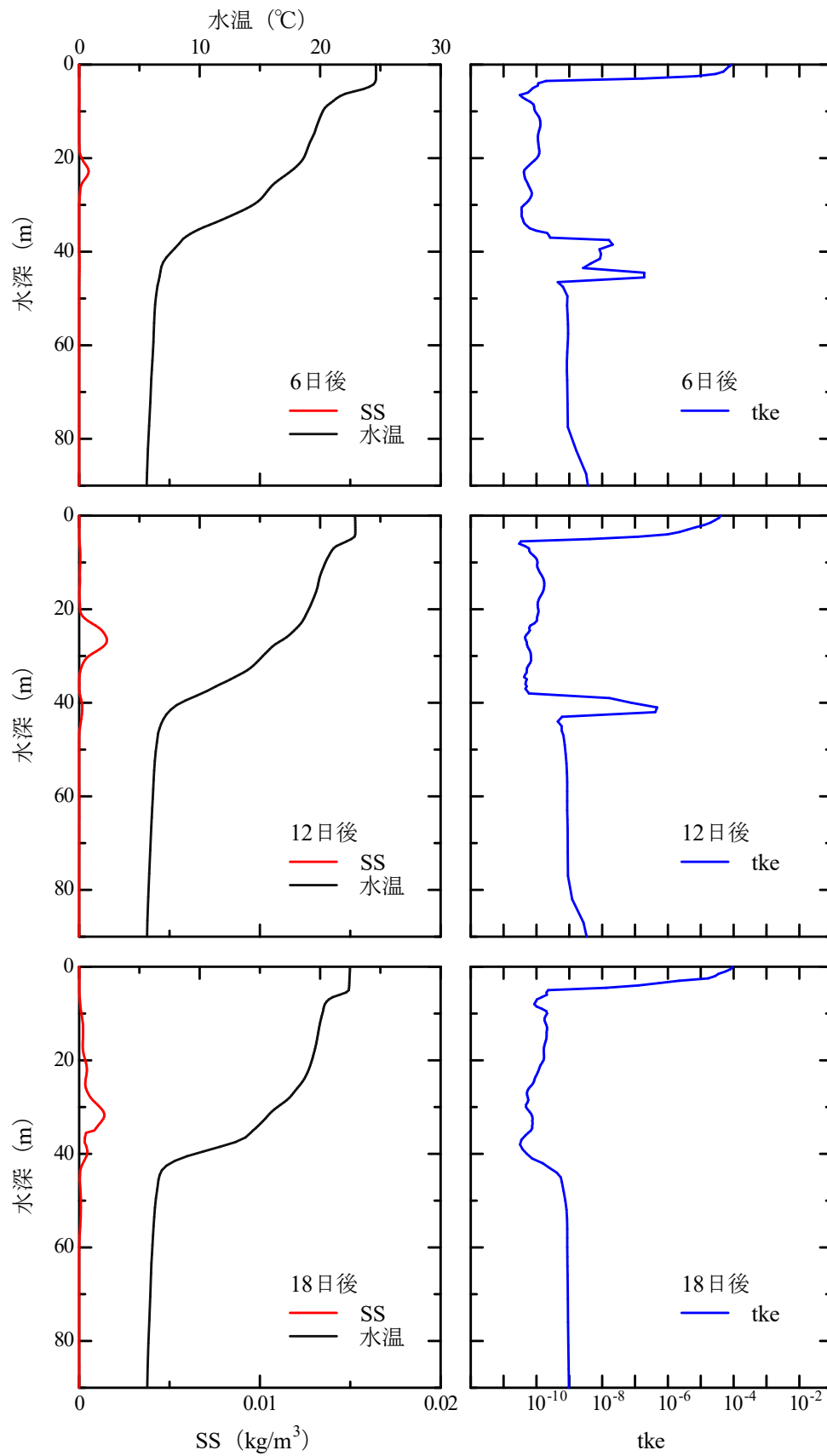


図 4-3-1 (g) Case-D- I の水温・SS・乱れエネルギーの鉛直分布

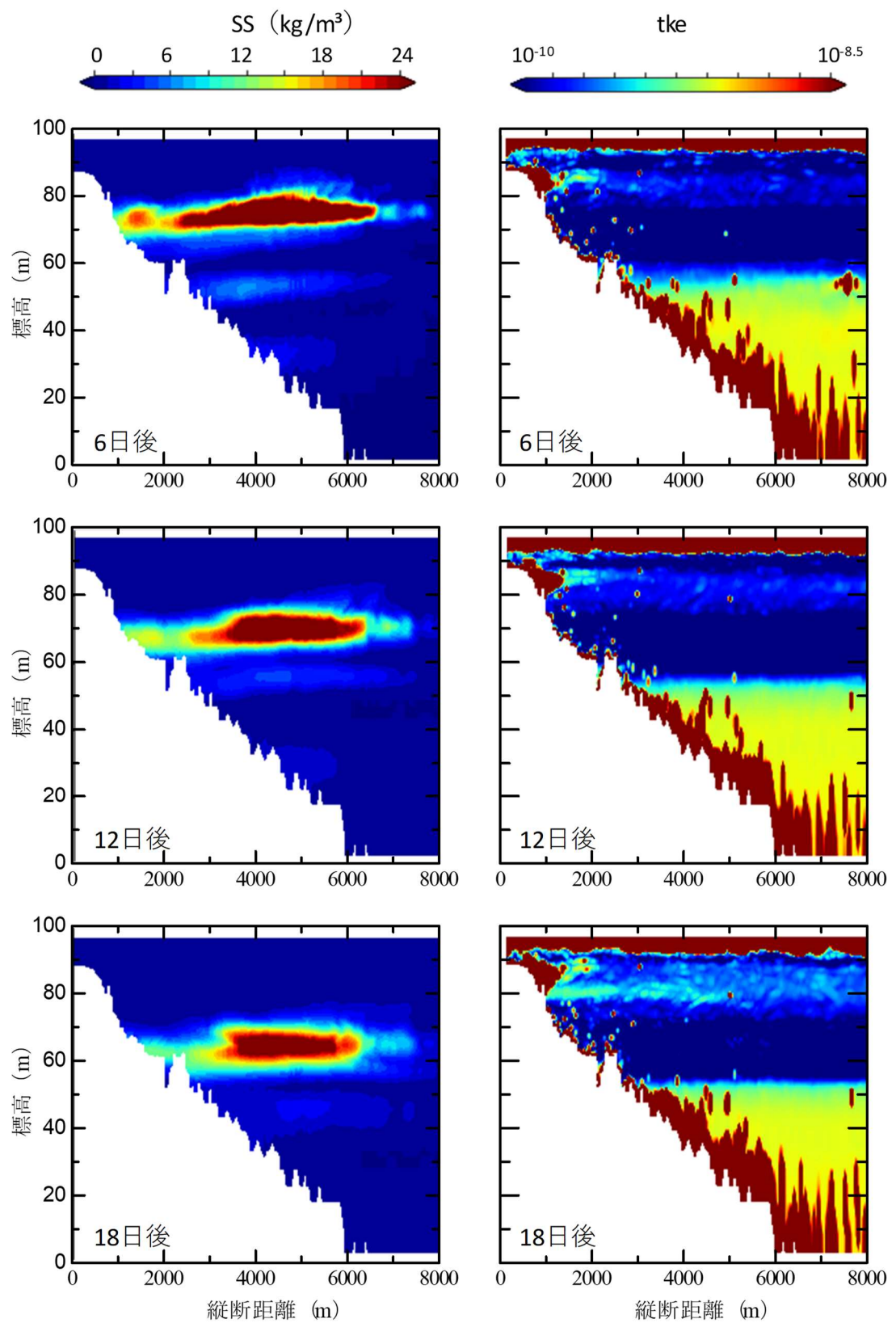


図 4-3-2 (g) Case-D- I の SS, 乱れエネルギーの縦断コンター図

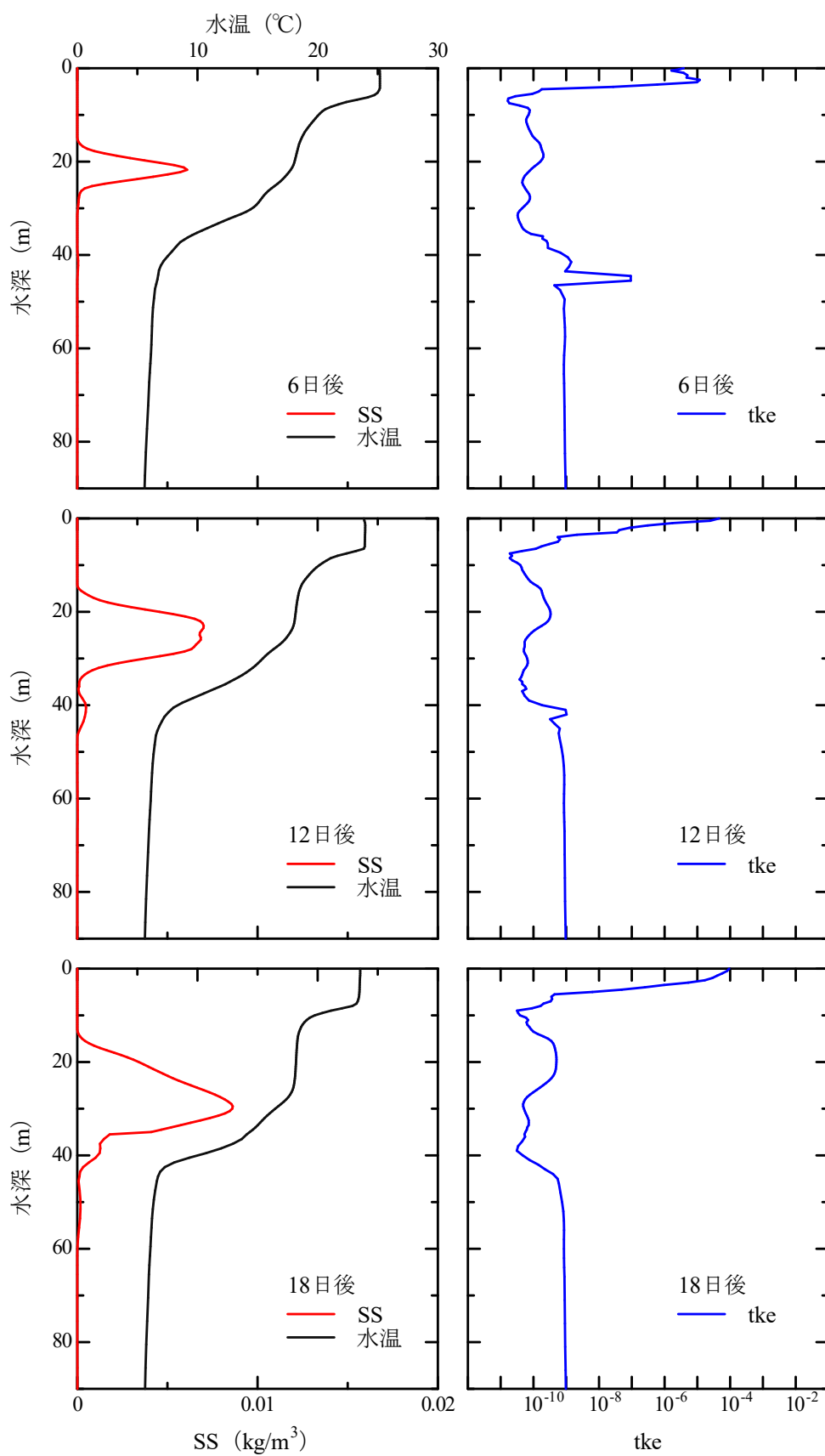


図 4-3-1 (h) Case-D-II の水温・SS・乱れエネルギーの鉛直分布

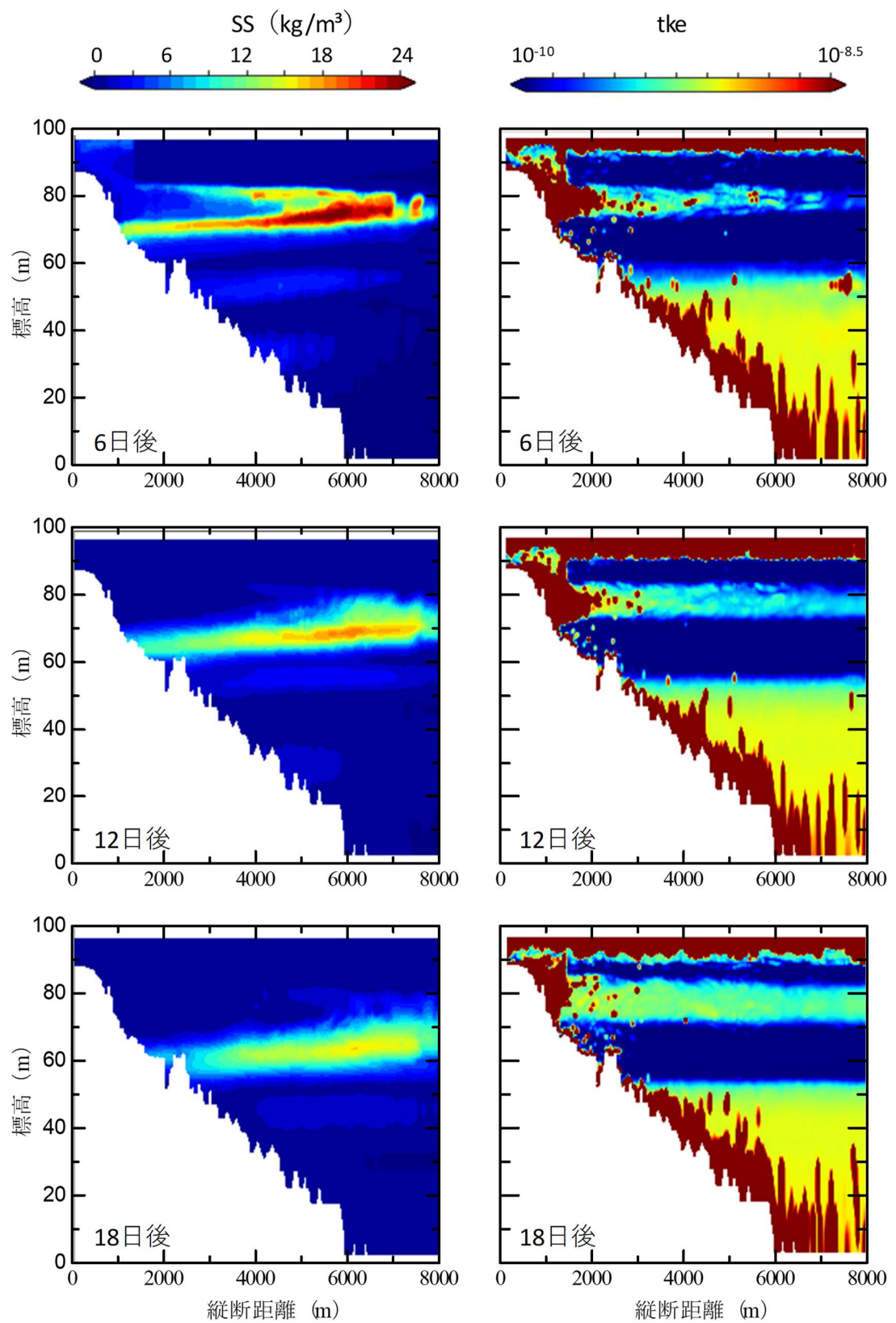


図 4-3-2 (h) Case-D-II の SS, 乱れエネルギーの縦断コンター図

第5章 結論

本研究では、2019年9月9日の台風15号で発生した洪水による濁水の観測を行い、採水したサンプルの粒度・SS濃度を分析し、貯水池内のSS粒子の沈降速度の検討をした。次に、三次元流動シミュレーションを用いて、沈降速度の与え方による再現性の検討を行った上で、選択取水設備と分画フェンスの運用法の違いがSSの排出率に与える影響についてケーススタディーを行った。

(1) SSの沈降速度の検討

粒子の沈降速度を再現するために、減衰率を設けたところ、 $10\mu\text{m}$ 以下の粒子を最大20%減衰させ、 10^{-5}cm/s に近い沈降速度にすることで、現実の沈降に近い計算を行うことができた。ストークス式を最大1/5程度にしなければならない理由としては、流動層における乱れが影響する可能性があることが分かった。

(2) 施設がSSの沈降に与える影響

三次元シミュレーションを用いて、施設の運用がSS鉛直分布にどのような影響をおよぼすか検討した。

取水深度に関しては、水温二次躍層位置と濁水の流入深度を一致させて水平移動させることが重要であると分かった。

分画フェンスに関しては、濁水が二次躍層付近に誘導さし、まとまって水平移動させることで、取水口に到達するまでの時間が短くなるため、排出されるSS量が多くなると考えられた。

以上より、濁水を分画フェンスによって、中層に誘導し水温二次躍層内で水平移動させること、取水深度をSSが流入から取水までに沈降する深度に合わせることの組み合わせが、SSの排出率を増加させるために重要であることが分かった。

参考文献

- 堀田哲夫, 陳飛勇東, 山下芳浩, 東海林光 (2002) : 成層型ダム湖における濁水特性と選択取水効果に関する事例的研究, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.1079-1084
- 新山雅紀, 甲賀大裕, 横山勝英, 小泉明, 山崎公子, 増子敦, 小林康浩, 峯岸宣遠 (2010) : 水源貯水池における分画フェンスが河川流入水の流動に及ぼす影響, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.1417-1422
- 新山雅紀, 小林真之, 横山勝英, 小泉明, 山崎公子, 増子敦, 池田麻衣子 (2011) : 小河内貯水池における水質保全施設の流動制御機能に関する研究, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.1501-1506
- 牧野育代, 寶馨, 立川康人 (2007) : 選択取水方式の導入が植物プランクトンの鉛直分布と生長環境に及ぼす影響, 水工学論文集, 第 51 巻, pp.1379-1384
- 矢島啓, Andrea Castelletti, Rodolfo Soncini-Sessa (2010) : 殿ダム貯水池における選択取水設備の最適運用の検討, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.1621-1626
- Wei hi, Jijian Lian, Ye Yao, Mudan Wu, Chao Ma (2017) : Modeling the effect of temperature-control curtain on the thermal structure in a deep stratified reservoir, Journal of Enviromental Management, vol.202, pp.106-116
- D.G. Nimal Priyantha, Takashi, Asaeda, Satoki Saitoh, Kohichi Gotoh (1997) : Modelling effects of curtain method on algal blooming in reservoirs, Ecological Modelling, 98, pp.89-104
- 秋山壽一郎, 重枝未玲, 安藤祐馬, 小野修平, 小川真由子 (2006) : フェンスによる貯水池潜入密度流の流動制御, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.1285-1290
- B.Hebbert, J.Patterson, I.Loh and J.Imberger (1979) : Collie river underflow into the Wellington reservoir, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.105, HY.5, pp.533-545.
- 福岡捷二・福嶋祐介・村田和夫・荒井健 (1980) : 成層化した二次元貯水池に流入する密度流の実験的研究, 土木学会論文報告集, 293 号, pp.65-77.
- 吉川秀夫・山本晃一 (1971) : 貯水池の水の挙動に関する研究, 土木学会論文報告集, 第

186 号, pp.39-54.

齋藤大作・清水泰行・坊野聡子・伊藤丹 (1998) : 洪水時のダム湖における濁水の観測と数値シミュレーション, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.709-714.

梅田信・横山勝英・石川忠晴 (1999) : セツ宿貯水池における洪水時の濁質の流動, 堆積過程に関する観測と数値解析, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.599-604.

梅田信・横山勝英・石川忠晴・銭新・高橋迪夫 (2000) : セツ宿貯水池における濁質の流入・流動・堆積過程に関する観測と数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.656, II-5, pp.255-268.

梅田信・池上迅・石川忠晴・富岡誠司 (2004) : ダム貯水池における洪水時濁水挙動に関する数値解析, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.1363-1368

日比野忠史, 永尾謙太郎, 松永康司 (2008) : 有機泥の分解を考慮した沈降と堆積過程のモデル化, 土木学会論文集 B, Vol.64, No.3, pp.202-213.

早川友康, 小泉明, 山崎公子, 横山勝英, 青木秀幸, 岩本智江 : 小河内貯水池における濁質沈降特性に関する研究, 全国水道研究発表会講演集, 第 63 回, pp.124-125.

細川恭史, 堀江毅, 三好英一, 加藤道康 (1982) : 沿岸域におけるけん濁粒子の沈降速度推定法について, 港湾技研資料, No.433

金山進, 清水琢三, 沼野祐二, 山田富郎, 植木一浩 (1991) : 取水港湾における現地泥の沈降特性, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp.486-490.

小枝豪志, TOUCH NARONG, 日比野忠史 (2010) : レーザ回折式粒度分布計による細粒子の沈降速度推定手法の確立, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.1051-1055.

岡村宏明・小枝豪志・中下慎也・日比野忠史 (2012) : 有機泥の沈降特性とフロック構造による有機泥密度の推定法の確立, 土木学会論文集 B2, Vol 68, No 2, pp.1031-1035

森北佳昭 (1987) : 貯水池流れと水温・濁度の二次元数値解析モデル, 水工学論文集, 第

31 巻, pp.521-526.

北澤弘美・北田真吾・湯浅岳史・佐藤親房・小泉明 (2007) : 小河内貯水池における湖水流動・水質モデルの構築, 水道協会雑誌, 第 874 号, pp.16-30.

北澤弘美・北田真吾・斉藤滋・佐藤親房・小泉明 (2008) : 小河内貯水池におけるアオコ発生抑制対策とその効果, 水道協会雑誌, 77(9), pp.10-24.

新谷哲也・中山恵介 (2009) : 環境流体解析を目的としたオブジェクト指向型流体モデルの開発と検証, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.1267-1272.

新谷哲也 (2016) : 3 次元非構造格子流体シミュレーターへの GLS 乱流クロージャーモデルの組み込みと検証, 水工学論文集, 第 60 巻

S.W.Chung, M.R.Hipsey, J.Imberger (2009) : Modelling the propagation of turbid density inflows into a stratified lake Daecheong Reservoir Korea, Environmental Modelling & Software, 24, pp.1467-1482.

李漢洙・山下隆男・一色陽平 (2007) : MITgcm によるダム湖流の 3 次元シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.381-385.

松永真弥 (2018) : 貯水池三次元シミュレーションにおける湖上風の与え方が水温・流速分布に及ぼす影響, 首都大学東京修士論文

木田重雄, 柳瀬眞一郎 : 乱流力学, 朝倉書店 pp26-31

二瓶泰雄, 宮本仁志他 : 土木の基礎固め 水理学, 講談社 pp114-118

謝辞

本研究を進めるにあたって、研究方針から観測のアドバイス、解析まで幅ひろいご指導を賜りました首都大学東京都都市環境学部都市環境学科都市基盤環境コース横山勝英教授に心より感謝します。

また、新谷先生には、数値シミュレーションに関する技術的な面だけでなく、研究に対する心構え・姿勢についても数多くご教示頂きました。本当にありがとうございました。

同大学院の酒井宏治准教授には本論文の副査を引き受けて下さり、貴重な助言を頂きました。ありがとうございました。

東京都水道局の千葉徹也様、佐藤萌子様をはじめ、小河内貯水池管理事務所、水源管理事務所の方々には、研究を行う上で貯水池の貴重なデータの提供、現地観測の際の調整など、様々な面で協力して頂きました。

グバッシュ特任助教には、授業やゼミの際に的確なご指導を頂き、大変参考になりました。英語が不得手な自分に対して、文法や単語の使い方など懇切丁寧に教えて下さいました。ありがとうございました。

同じ小河内チームの博士2年生のマウリスさんには多くのことを相談し、協力して研究を行いました。英語が得意でない私と、根気強く議論を重ねてくれたことに感謝しています。

同期である梅田雄太、奥山諒平は3年間同じ境遇の下で互いに協力し合いながら、ここまで研究室生活を乗り切ることができました。度々、色んなことで迷惑をかけてしまいましたが、3年間本当にありがとうございました。そしてお疲れ様でした。

M1の稲川さんは、解析や論文執筆の際に協力して下さい、とても助かりました。また、普段の他愛もない会話が、辛い研究室生活の中での良い息抜きになりました。チャールズ君、ネリーさんは観測の手伝いを快く引き受けてくれたこと、非常に感謝しています。来年度はM2として、後輩達の手本になれるよう頑張ってください。

同じ研究室のベラパガさん、キラナさんは他愛もない会話で研究室の日常を盛り上げてくれました。

学部4年生の浅野君、木下君、中川さん、松下君、山内君はいつも明るく研究室を盛り上げてくれました。今後の活躍を願っています。

小河内での研究を行う中では、学部4年生から修士2年生までの3年間の中で、先輩である松永真弥さん、高木裕雄さん、李良辰さんによりとても多くのものを学ばせて頂きました。心から尊敬するとともに、感謝しています。

本論文は、以上の皆様によるご協力の賜物です。皆様から授かった様々な知識や経験を糧に今後とも精進して参りたいと思います。

最後になりますが，やりたいことに全力で打ち込めた学生生活を作ってくれた両親に感謝し，本研究の謝辞とさせていただきます．